



ЖУРНАЛ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ЭКОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

ECOLOGY

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

3

2025

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

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

**Заместитель
главного
редактора**

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

**Ответственный
секретарь**

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

Батян А. Н.

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

Головатый С. Е.

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

Голубев А. П.

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

Гричик В. В.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Дардынская И. В.

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

Дзятковская Е. Н.

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

Дроздович В. В.

Национальный институт рака, США, Бетесда.

Зафранская М. М.

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

Кильчевский А. В.

Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Коноплев А. В.

Институт радиоактивности окружающей среды университета г. Фукусима, Япония.

Коровин Ю. А.

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

Ленгфельдер Э.

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

Либерамос Г.

Афинский технический университет, Афины, Греция.

Линге И. И.

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

Лукашенко С. Н.

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

Логинов В. Ф.

Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Медведев С. В.

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

Набиев И. Р.

Реймский университет, Франция, Реймс.

Степанов С. А.

Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Россия.

Стожаров А. Н.

Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь.

Тарутин И. Г.

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

EDITORIAL BOARD

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

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 631.4.6(584.4)

ВЛИЯНИЕ КАТТАКУРГАНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА НА ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ И ПРОЦЕСС ГИДРОМОРФИЗМА

З. А. ЖАББАРОВ¹⁾, Т. АБДРАХМАНОВ¹⁾, Г. Т. ДЖАЛИЛОВА¹⁾, С. К. МАҲАММАДИЕВ¹⁾,
Ш. З. АБДУЛЛАЕВ¹⁾, О. Н. ИМОМОВ¹⁾, С. К. ЗАКИРОВА¹⁾, Д. Ю. МАХКАМОВА¹⁾, Ж. Ж. АБДУКАРИМОВ¹⁾

¹⁾Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека,
ул. Университетская, 4, 100174, г. Ташкент, Узбекистан

В исследовании определено состояние гидроморфизма почв, расположенных вокруг Каттакурганского водохранилища. Установлено, что изменение морфологических признаков почвы, а также наличие болотных и глеевых горизонтов проявляется на разных расстояниях и в различных направлениях. Согласно результатам исследований, на восточной, южной и западной сторонах водохранилища гидроморфизм почв не наблюдается. Это связано с тем, что данные территории расположены на 60–68 м выше уровня моря по сравнению с северной частью и не используются в сельскохозяйственной деятельности. На северной стороне ситуация противоположная: земли находятся ниже уровня моря относительно южной, восточной и западной частей. Здесь расположены входной и выходной каналы водохранилища, а также коллекторно-дренажная система, работающая недостаточно эффективно. В результате происходит постоянное повышение уровня грунтовых вод (на глубине около 82 см), что способствует развитию процессов гидроморфизма. Влияние водохранилища на почвенный покров северной стороны выражено неравномерно: наибольшее поднятие грунтовых вод зафиксировано в северо-западной части – до 3–3,5 км от водохранилища. В северо-восточной зоне влияние распространяется до 2 км, а в северной – до 1,7 км.

Ключевые слова: почва; гидроморфизм; растительность; экологическое состояние; грунтовые воды; засоление; оглеение; гумус.

Благодарность. Настоящие исследования выполнены в рамках инновационного проекта № IL-9224094166 «Создание картографических моделей экологического и мелиоративного состояния почв, распространенных вокруг Каттакурганского водохранилища», финансируемого Агентством инновационного развития Республики Узбекистан. Выражаем благодарность Агентству и Национальному университету Узбекистана за оказанную поддержку.

Образец цитирования:

Жаббаров ЗА, Абдрахманов Т, Джалилова ГТ, Махаммадиев СК, Абдуллаев ШЗ, Имомов ОН, Закирова СК, Махкамова ДЮ, Абдукаримов ЖЖ. Влияние Каттакурганского водохранилища на почвенный покров и процесс гидроморфизма. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;3:4–20.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-4-20>

For citation:

Jabbarov ZA, Abdrakhmanov T, Jalilova GT, Mahammadiev SK, Abdullaev ShZ, Imomov ON, Zakirova SK, Makhkamova DJu, Abdukarimov JZh. Influence of the Kattakurgan reservoir on soil cover and hydromorphism process. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;3:4–20. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-4-20>

Авторы:

Зафаржон Абукаримович Жаббаров – доктор биологических наук, профессор; заведующий кафедрой почвоведения.

Гулнора Тулкуновна Джалилова – доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры почвоведения.

Тохтасин Абдрахманов – кандидат сельскохозяйственных наук, профессор; профессор кафедры почвоведения.

Самад Киличевич Махаммадиев – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; доцент кафедры почвоведения.

Шохрух Зафаржон угли Абдуллаев – преподаватель кафедры почвоведения.

Отамурод Нормаматович Имомов – аспирант кафедры почвоведения.

Саломат Касимбаевна Закирова – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; доцент кафедры почвоведения.

Дилафруз Юлдашевна Махкамова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры почвоведения.

Жавохир Жахонгир угли Абдукаримов – студент.

Authors:

Zafarjon A. Jabbarov, doctor of science (biology), professor; head of the department of soil science.

zafarjonjabbarov@gmail.com

Gulnora T. Jalilova, doctor of science (biology), professor; professor at the department of soil science.

jalilova.gulnora.2024@gmail.com

Tokhtasin Abdrakhmanov, PhD (agriculture), professor; professor at the department of soil science.

soilecology@yandex.ru

Samad K. Makhammadiev, PhD (agriculture), docent; associate professor at the department of soil science.

mahammadiev3@gmail.com

Shokhrukh Z. ugli Abdullaev, lecturer at the department of soil science.

shoxabdullaev1996@gmail.com

Otamurod N. Imomov, postgraduate student at the department of soil science.

shoxabdullaev1996@gmail.com

Salomat K. Zakirova, PhD (agriculture), docent; associate professor at the department of soil science.

szzakirova@mail.com

Dilafruz Yu. Makhkamova, PhD (biology), docent; associate professor at the department of soil science.

d.makhkamova@nuu.uz

Javokhir Zh. ugli Abdukarimov, student.

javokhir2001@mail.ru

INFLUENCE OF THE KATTAKURGAN RESERVOIR ON SOIL COVER AND HYDROMORPHISM PROCESS

**Z. A. JABBAROV^a, T. ABDRAKHMANOV^a, G. T. JALILOVA^a, S. K. MAHAMMADIEV^a,
Sh. Z. ABDULLAEV^a, O. N. IMOMOV^a, S. K. ZAKIROVA^a, D. Ju. MAKHKAMOVA^a, J. Zh. ABDUKARIMOV^a**

^aNational University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek,

4 University Street, Tashkent 100174, Uzbekistan

Corresponding author: Z. A. Zhabbarov (*zafarjonjabbarov@gmail.com*)

The article determines the state of soil hydromorphism located around the Kattakurgan Reservoir. It is established that changes in the morphological characteristics of the soil, as well as the presence of bog and gley horizons are manifested at different distances and in different directions. According to the research results, soil hydromorphism is not observed on the eastern, southern and western sides of the reservoir. This is due to the fact that these territories are located 60–68 m above sea level compared to the northern part and are not used in agricultural activities. On the northern side, the situation is the opposite: the lands are below sea level relative to the southern, eastern and western parts. The inlet and outlet channels of the reservoir are located here, as well as the collector and drainage system, which does not work efficiently enough. As a result, there is a constant increase in the groundwater level (at a depth of about 82 cm), which contributes to the development of hydromorphism processes. The influence of the reservoir on the soil cover of the northern side is expressed unevenly: the greatest rise in groundwater is recorded in the northwestern part – up to 3–3.5 km from the reservoir. In the northeastern zone, the influence extends up to 2 km, and in the northern – up to 1.7 km.

Keywords: soil; hydromorphism; vegetation; ecological state; groundwater; salinization; gleization; humus.

Acknowledgments. This research was carried out within the framework of the innovative project No. IL-9224094166 «Creation of cartographic models of the ecological and meliorative state of soils distributed around the Kattakurgan reservoir», financed by the Agency for Innovative Development of the Republic of Uzbekistan. We express our gratitude to the Agency and the National University of Uzbekistan for the support provided.

Введение

Вокруг водохранилищ происходят изменения почвенного покрова (меняются его геоморфологические характеристики, усиливаются процессы гидроморфизма), что приводит к деградации почв. Степень этого

нарушения можно оценить по четырехбалльной шкале [1]. Исследования в районе водохранилища показали, что с течением времени процессы гидроморфизма усилились. Повысилось содержание таких элементов, как Ba, Co, V, Cu, Zn, Fe и Al. Отмечаются засоление почв, расширение площади луговой растительности, резкое изменение флоры и увеличение выделения газа CH_4 [2; 5; 11; 13]. Анализ изменений почв и растительного покрова с использованием индекса NDWI показал точность 97 %, что свидетельствует о высокой эффективности данного метода [3; 4; 6; 8–10].

В условиях постоянного воздействия водоемов в почвенном и растительном покрове происходят следующие гидрогенные изменения: проявление морфологических признаков гидроморфизма, загрязнение почвы, снижение содержания физической глины, увеличение площади оголенных пород и почвообразующих отложений, уменьшение содержания гумуса, резкое изменение растительного мира и др. [14].

В результате постоянного удержания влаги в почвенных горизонтах изменяются их свойства и снижается плодородие. В частности, почвы приобретают кислую-щелочную реакцию (pH от 5,6 до 9,1), обладают песчаной и суглинистой структурой, содержат среднее и высокое количество органического вещества (от 1,7 до 8,0 %) и общего азота (от 0,01 до 0,26 %). Наблюдается средняя и умеренная катионообменная способность (СЕС – от 3,13 до 15 смоль/кг) и высокий уровень базового насыщения (от 72 до 81 %). В обоих почвенных типах (камбисолах и ареносолах) основными катионами являются Ca^{2+} (от 0,7 до 25,7 смоль/кг) и Na^+ (от 0,19 до 9,5 смоль/кг), а содержание K^+ невелико. Кроме того, органическое вещество постепенно изменяется: из-за процессов разложения и оглеения его общее количество снижается [15; 16].

Под гидроморфизмом понимают совокупность морфогенетических изменений почвы, вызванных постоянным или периодическим переувлажнением, что приводит к формированию специфических морфологических признаков, физико-химических свойств и биогеохимических режимов [19]. Они включают смену окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и водородного показателя среды (pH), разрушение почвенных агрегатов, миграцию соединений железа (Fe), марганца (Mn) и фосфора (P), высвобождение соединений азота (N) и растворенного органического углерода, изменения в составе почвенного микробного сообщества, а также ускоренную эрозию склонов в пределах зоны переменного уровня воды – прибрежной полосы, которая периодически оказывается затопленной или осушенной в зависимости от режима эксплуатации водохранилища [20].

Регулярное чередование фаз затопления и осушения, характерное для крупнейших мировых водохранилищ, вызывает снижение устойчивости структуры почвы и ускоренную минерализацию органического вещества [21; 22]. При этом колебания уровня воды усиливают вертикальную неоднородность почв по гипсометрии и способствуют развитию оползневых процессов. Результаты глобальных исследований подтверждают, что интенсивность гидроморфных процессов определяется как гидрологическим режимом, так и климатическими условиями. Работа [Qin, et al., 2025] на глобальном уровне подтвердила, что изменения зон колебаний уровня воды зависят от гидрологических и климатических факторов, что согласуется с природой явления гидроморфизма, регулируемого как водным режимом, так и температурно-влажностными условиями [23].

Кроме того, исследования на примере китайских водохранилищ подтвердили значимую зависимость деградации структуры почв от высотного положения. [Lv, et al., 2024] выявили, что устойчивость почвенных агрегатов значительно уменьшается в нижних и средних частях зоны колебаний уровня воды, тогда как на более высоких участках наблюдается повышение стабильности структуры [24]. Здесь можно отметить, что зависимость деградации структуры почв от высотного положения может отражать влияние **градиента увлажнения** внутри зоны колебаний: в нижних и средних частях переувлажнение и, соответственно, гидроморфные процессы наиболее интенсивны и вызывают деструкцию агрегатов. На более высоких участках условия менее гидроморфные, и почвенная структура оказывается более стабильной. При искусственном понижении уровня воды в водохранилищах происходит разрушение агрегатов и высвобождение подвижных форм азота, фосфора и микроэлементов – типичных признаков гидроморфизма. [Lewis, et al., 2024] изучали процессы, происходящие при искусственном понижении уровня воды в водохранилищах, и показали, что в периоды спуска наблюдается не только изменение физической структуры почвы, но и рост содержания подвижных форм питательных элементов, приводящий к их вымыванию в водоем [25]. Следует отметить, что высвобождение подвижных форм азота, фосфора и микроэлементов связано с разрушением почвенных агрегатов и изменением окислительно-восстановительных условий – типичным проявлением гидроморфизма, при котором активизируются процессы мобилизации элементов питания. Они сопровождаются перестройкой форм органического углерода: в фазу затопления часть углерода аккумулируется в анаэробных условиях, а при осушении быстро минерализуется с выделением CO_2 и CH_4 . [Ran, et al., 2024] подтвердили, что гидроморфизм в таких условиях сопровождается изменением форм органического углерода: часть его фиксируется в верхних горизонтах в результате анаэробного накопления, но при последующем осушении подвергается быстрой минерализации с выделением углекислого газа и метана [26].

Исследования [Sun, et al., 2024] также показали, что гидроморфизм проявляется в результате регулярного воздействия воды, сопровождающегося чередованием *анаэробных* (под водой) и *аэробных* (после осушения) условий, а такие циклы приводят к разрушению почвенных агрегатов, снижению среднего взвешенного диаметра, перераспределению органического углерода в сторону более лабильных фракций [27]. Чередование анаэробных и аэробных фаз при гидроморфизме перестраивает состав микробных сообществ, изменяя долю денитрифицирующих, метаногенных и нитрифицирующих групп. Это сопровождается сдвигами в ферментативной активности и скоростях трансформации органики и питательных элементов [28]. Важной особенностью является снижение устойчивости растворенного органического вещества при многократных переходах «вода – суша», что облегчает его минерализацию и вынос углерода в атмосферу. Новые данные для прибрежных зон водохранилища показывают хрупкость *растворенного органического вещества*: при многократных переходах «вода – суша» устойчивость его снижается, что облегчает минерализацию и поток углерода в воду и атмосферу [29]. При гидроморфизме, вызванном «антисезонным» регулированием уровня, происходит изменение соотношений органических и неорганических форм фосфора и азота. В фазу затопления фосфор переходит в подвижные формы, а азот – в аммонийную; в фазу осушки усиливается минерализация органических соединений и накапливаются нитратные формы. При повторном затоплении эти соединения выносятся в акваторию, повышая риск эвтрофикации [30]. Гидроморфизм формирует сезонную мозаичность эмиссий парниковых газов (CH_4 , CO_2 , N_2O). В затопленной фазе активизируется метаногенез, а при осушке – окисление метана, причем используются как кислород, так и альтернативные акцепторы электронов (нитраты, сульфаты, оксиды металлов) [31]. В Центральной Азии исследования фиксируют проявления так называемого «пульсирующего вторичного гидроморфизма» – кратковременные увлажнения и осушки, вызванные, например, подпиткой из заливов, изменяемые солевой профиль и состав растительности [32]. На примере Каттакурганского водохранилища установлено, что основное воздействие проявляется в накоплении солей и изменении физико-механических свойств почв, тогда как другие параметры трансформации выражены слабее [33]. Исследование Курвантаева (2021) показало усиление гидроморфизма на третьей террасе Зеравшана, обусловленное недостаточной дренированностью после создания водохранилища, что характеризуется появлением лугово-ирригационных почв и отмечается связь с затоплением и высоким уровнем грунтовых вод [34]. Таким образом, гидроморфизм в прибрежных зонах водохранилищ является многофакторным процессом, зависящим от гидрологического режима, климатических условий и особенностей эксплуатации гидротехнических сооружений. Его последствия затрагивают не только почвенные свойства, но и функционирование прибрежных экосистем, а также качество водных ресурсов. Понимание этих процессов критически важно для разработки стратегий устойчивого управления водохранилищами в условиях изменения климата и возрастающей антропогенной нагрузки.

Методы и материалы исследования

Исследования проводились на почвах, расположенных вокруг Каттакурганского водохранилища в Каттакурганском р-не Самаркандской обл. Узбекистана. Оно является первым в Узбекистане и относится к типу грунтовых, то есть его дно не забетонировано. Восточная, южная и западная стороны водоема находятся на высоте 514–588 м над уровнем моря и представлены богарными (неорошаемыми) землями. Северная сторона расположена на высоте 482–490 м над уровнем моря и представлена орошаемыми серо-луговыми почвами, используемыми в сельском хозяйстве. Почвенные образцы были отобраны на северной стороне, условно разделенной на три направления. Для сопоставления почвенные разрезы были заложены на восточной, южной и западной сторонах водохранилища, где также были собраны образцы (рис. 1).

При отборе почвенных образцов использовался международный стандарт ISO 10381-2:2002, а при описании морфологических признаков почвы в полевых условиях – ISO 25177:2020. При этом определялись следующие показатели: цвет почвы – по шкале *Munsell Soil Color Chart*; структура – по гранулометрическим формам; прочность структуры – слабая, средняя, плотная; влажность – влажная, сухая, липкость; признаки оглеения и засоления – наличие белых пятен, солевых выделений, ржавых пятен; количество корней – много, среднее, мало; тип материнской породы – песок, лесс, глина и др. [17; 18].

Результаты исследования и их обсуждение

В орошаемых землях Каттакурганского водохранилища, вовлеченных в сельское хозяйство, были выкопаны почвенные разрезы и изучен процесс гидроморфизма, исследованы изменения морфологических признаков. Ниже приводится анализ морфологических признаков почвенных разрезов.

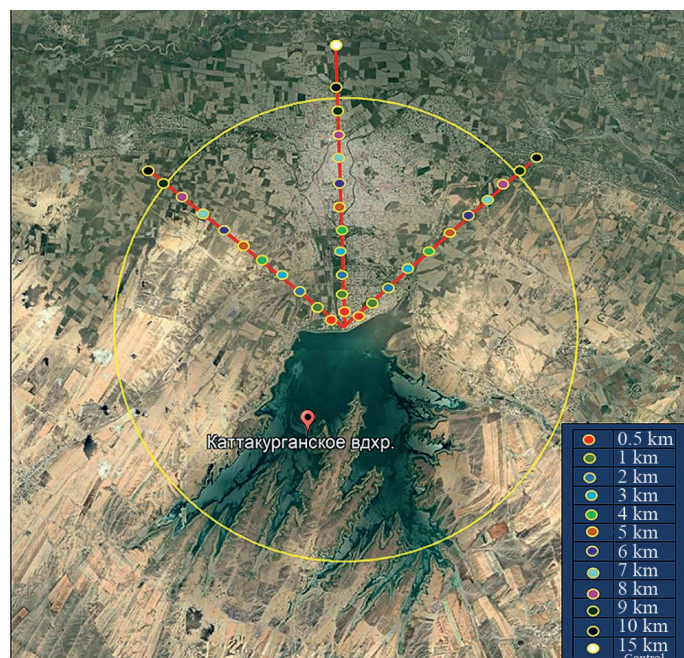


Рис. 1. Схема расположения почвенных образцов, отобранных в районе исследования

Fig. 1. Schematic diagram of the location of soil samples collected in the study area

Орошаемые сероземно-луговые почвы, 490 м над уровнем моря. Данный разрез выкопан в северо-западном направлении от Каттакурганского водохранилища на расстоянии 0,4 км. Ранее на этой территории выращивались пшеница и кукуруза, под влиянием водохранилища и постоянного воздействия влаги земли вышли из состояния земледелия и были заняты растениями, произрастающими во влажных условиях, в частности тростником, который покрыл участок. Грунтовые воды вышли на глубину 78 см (рис. 2).

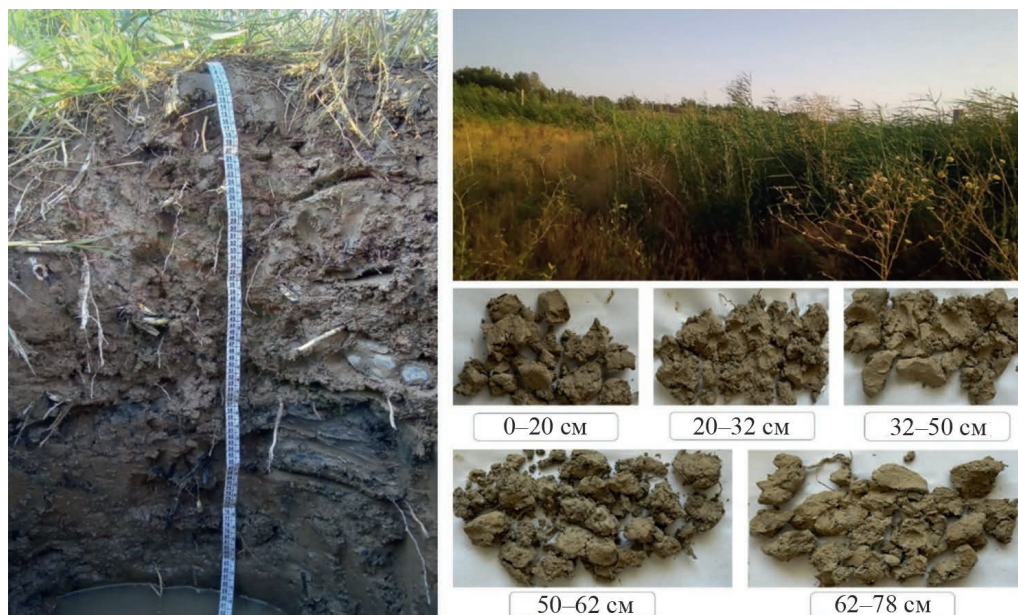


Рис. 2. Морфологические признаки разреза Sh.G'-2025-1 в северо-западном направлении Каттакурганского водохранилища

Fig. 2. Morphological features of the section Sh.G'-2025-1 in the north-western direction of the Kattakurgan reservoir

0–20 см. Цвет желтовато-полевой; среднеувлажненный; механический состав – среднесуглинистый; среднеуплотненный; структура комковатая. Встречаются корни растений и следы насекомых, а также перегнившие и полуперегнившие растительные остатки. В горизонте имеются ржавые и синеватые пятна в небольшом количестве, к нижней части их количество увеличивается. Переход к следующему горизонту по изменению влажности и структуры.

20–32 см. Цвет желтый полевой; механический состав – среднесуглинистый; сильно увлажненный; среднеуплотненный; к низу плотность увеличивается; структура мелкокомковатая, пластинчатая. В горизонте встречаются ржавые, синеватые и белые солевые пятна. Корни растений и следы насекомых встречаются редко. Переход к следующему горизонту по изменению цвета и механического состава.

32–50 см. Цвет светло-желтый; механический состав – легкосуглинистый; сильно увлажненный; сильно уплотненный; структура пластинчатая и комковатая. Синеватые пятна встречаются редко, корни растений и следы насекомых встречаются редко. В горизонте имеются мелкие остроугольные камни. Переход к следующему горизонту по изменению цвета.

50–62 см. Цвет голубовато-серый; сильно увлажненный. Механический состав – среднесуглинистый; встречаются тяжелые механические включения; сильно уплотненный, структура пластинчатая. Ржавые пятна встречаются в большом количестве. Корни растений встречаются редко, следы насекомых отсутствуют. Переход к следующему горизонту по изменению плотности.

62–78 см. Цвет голубовато-серый, сильно увлажненный. Механический состав – среднесуглинистый, встречаются тяжелые механические включения. Сильно уплотненный, структура пластинчатая. Ржавые и синеватые пятна встречаются в большом количестве. Корни растений встречаются редко, следы насекомых отсутствуют. На глубине 78 см выявлен уровень грунтовых вод.

Разрез 2, северное направление. Орошаемые сероземно-луговые почвы, 495 м над уровнем моря. Средний механический состав, слабое засоление. Разрез заложен в северном направлении на расстоянии 0,4 км от Каттакурганского водохранилища. На данной территории недавно был заново выкопан коллекторно-дренажный канал, работающий достаточно эффективно и приведший к снижению уровня грунтовых вод (по словам руководителя фермерского хозяйства, до прокладки дренажа грунтовые воды выходили с глубины 0,8–1 м). В целом, разрез был заложен на участке, засаженном люцерной, однако вокруг территорию в значительной степени покрывает тростник. В процессе раскопки разреза уровень грунтовых вод был выявлен на глубине 120 см (рис. 3).

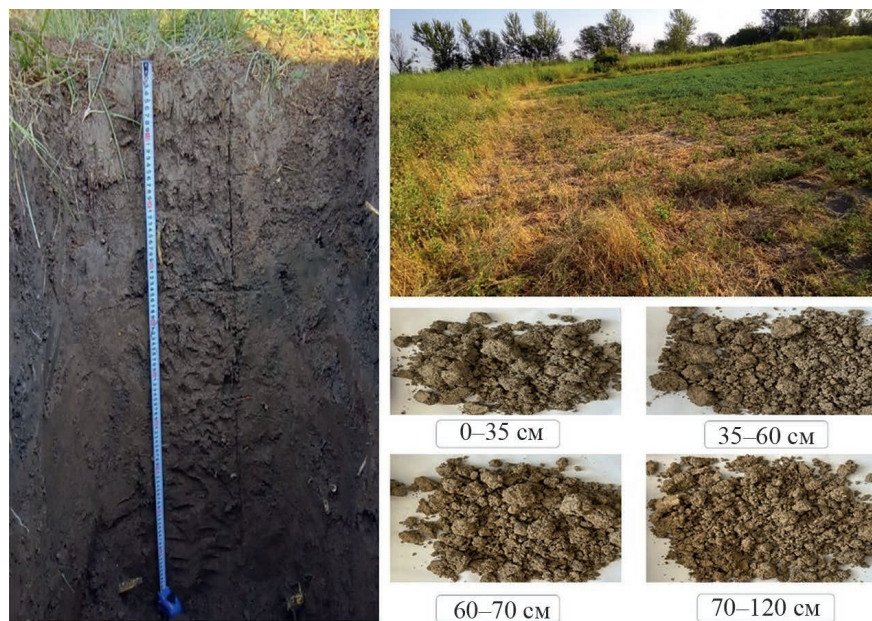


Рис. 3. Морфологические признаки разреза 2 в северном направлении Каттакурганского водохранилища

Fig. 3. Morphological features of section 2 in the northern direction of the Kattakurgan reservoir

0–35 см. Цвет светло-серый; к низу светлеет, среднеувлажненный. Механический состав – среднесуглинистый; структура комковатая; пластинчатая; слабо уплотненный. Много корней растений и следов насекомых. Встречаются перегнившие и полуперегнившие растительные остатки. В горизонте имеются белые солевые пятна в небольшом количестве, к низу их становится больше. Небольшое количество мелких камней. Переход к следующему горизонту по изменению влажности.

35–60 см. Светло-серый цвет, светлее по сравнению с верхним горизонтом. Механический состав – среднесуглинистый; умеренно увлажненный; слабо уплотненный, к низу уплотнение усиливается; структура мелкокомковатая, пластинчатая. Белые солевые пятна встречаются, их количество несколько

ко больше, чем в верхнем горизонте. Имеются корни растений и следы насекомых. Очень небольшое количество мелких камней. Переход к следующему горизонту по изменению окраски.

60–70 см. Светло-бурый цвет. Механический состав – среднесуглинистый; сильно увлажненный; среднеуплотненный, плотность выше по сравнению с вышележащим горизонтом; структура пластинчатая и комковатая. Ржавые, синеватые и белые солевые пятна встречаются редко. Корни растений и следы насекомых встречаются редко. Переход к следующему горизонту по изменению окраски.

70–120 см. Цвет бурый, окраска более насыщенная по сравнению с вышележащим горизонтом; сильно увлажненный. Механический состав – среднесуглинистый; среднеуплотненный; структура пластинчатая, комковатая и зернистая. Ржавые, синеватые и белые солевые пятна встречаются чаще, чем в вышележащем горизонте. Корни растений встречаются редко, следы насекомых отсутствуют. На глубине 120 см выявлен уровень грунтовых вод.

Северо-восточная сторона, разрез 3. Орошаемые типичные сероземы, 495 м над уровнем моря. Средний механический состав; незасоленные. Разрез заложен в северо-восточном направлении на расстоянии 0,4 км от Каттакурганского водохранилища. Территория занята многолетними садами, где посажены персиковые и абрикосовые деревья, между деревьями выращиваются пшеница и люцерна (рис. 4).



Рис. 4. Морфологические признаки разреза 3 в северо-восточном направлении Каттакурганского водохранилища

Fig. 4. Morphological features of section 3 in the north-eastern direction of the Kattakurgan reservoir

0–21 см. Цвет темно-желтовато-полевой; среднеувлажненный. Механический состав – среднесуглинистый; структура комковатая, пылеватая; слабо уплотненный. Много корней растений и следов насекомых. Встречаются перегнившие и полуперегнившие растительные остатки. Присутствуют остроугольные мелкие щебнистые камни. Переход к следующему горизонту по изменению окраски.

21–57 см. Желтовато-полевой, светлее по сравнению с верхним горизонтом. Механический состав – среднесуглинистый; умеренно увлажненный; среднеуплотненный, к низу плотность снижается; структура мелкокомковатая, пылеватая. Корни растений и следы насекомых встречаются редко. Присутствуют остроугольные мелкие щебнистые камни. Переход к следующему горизонту по изменению плотности.

57–112 см. Желтовато-полевой цвет. Механический состав – среднесуглинистый; умеренно увлажненный; слабо уплотненный; структура мелкокомковатая, пылеватая. Встречаются конкреции и белые солевые пятна, к низу их количество увеличивается. Корни растений и следы насекомых встречаются редко. В горизонте имеются остроугольные мелкие камни. Переход к следующему горизонту по изменению влажности.

112–165 см. Желтовато-полевой цвет с бурым оттенком; умеренно увлажненный, по сравнению с вышележащим горизонтом несколько больше. Механический состав – среднесуглинистый; слабо уплотненный; структура мелкокомковатая, пылеватая. Корни растений встречаются редко, следы насекомых отсутствуют. Встречаются конкреции и белые солевые пятна.

Восточная сторона, разрез 4. Богарные типичные сероземы, в результате хозяйственной деятельности территория превращена в сад с плодовыми саженцами посредством искусственного орошения, 588 м над уровнем моря. Средний механический состав, незасоленные. Разрез заложен в северо-восточном направлении на расстоянии 5 км от Каттакурганского водохранилища. Территория занята многолетним садом, где выращиваются персиковые и абрикосовые деревья, между деревьями посеяны пшеница и люцерна (рис. 5).

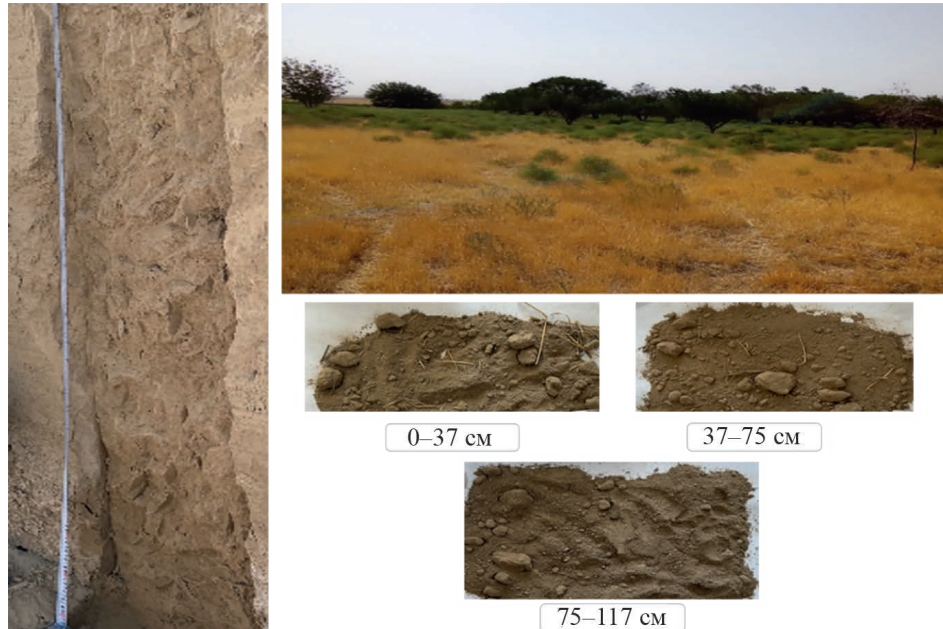


Рис. 5. Морфологические признаки разреза 4 в восточном направлении Каттакурганского водохранилища

Fig. 5. Morphological features of section 4 in the eastern direction of the Kattakurgan reservoir

0–37 см. Серый цвет; сухой. Механический состав – среднесуглинистый; структура комковатая; среднеуплотненный. Много корней растений, встречаются следы насекомых. Является дерновым горизонтом.

37–75 см. Серый цвет; слабо увлажненный. Механический состав – среднесуглинистый; слабо уплотненный. Корни растений встречаются редко, следы насекомых единичные. Новообразований и включений не обнаружено.

75–117 см. Светло-серый цвет; слабо увлажненный; среднесуглинистый; слабо уплотненный. Корни растений встречаются редко, следы насекомых – очень редко. Присутствуют карбонатные пленки и конкреции в виде белых пятен. Ниже начинается материнская порода, поэтому в данном горизонте отчетливо выражены признаки лёсса.

Южная сторона, разрез 5. Богарные типичные сероземы, расположенные на расстоянии 3 км от водохранилища, на высоте 519 м над уровнем моря. Местность имеет неровный рельеф. Произрастают различные виды дикой растительности, частично засохшей. Поверхностный слой почвы очень сухой. Влияние водохранилища на растительный покров и морфологические признаки почвы не проявляется (рис. 6).

0–53 см. Серый цвет. Механический состав – плотный, пылеватый, мелкоструктурный, легкосуглинистый. Корни растений встречаются редко, образуют слабую дернину; следы насекомых встречаются редко. Переход к следующему горизонту выраженный.

53–94 см. Серый цвет, отчетливо проявляются признаки образования в лёссе. Механический состав – плотный, мелкоструктурный, слабо пористый; среднесуглинистый. Корни растений встречаются редко, следы насекомых также редки. Карбонаты встречаются в различных формах. Ниже проявляется материнская порода – лёсс.

Западная сторона, разрез 5. Богарные типичные сероземы, расположенные на расстоянии 3 км от водохранилища, на высоте 514 м над уровнем моря. Местность имеет неровный рельеф. Посадки сельскохозяйственных культур отсутствуют; наблюдается высокий уровень проективного покрытия различными видами растительности. Поверхностный слой почвы очень сухой. Влияние водохранилища на растительный покров и морфологические признаки почвы не проявляется (рис. 7).

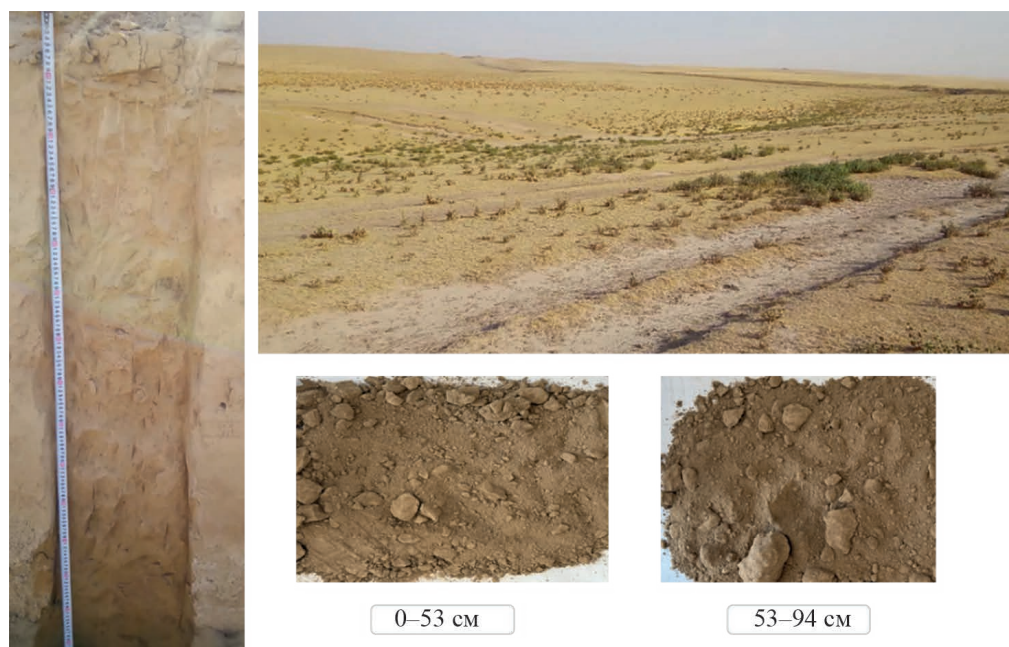


Рис. 6. Морфологические признаки разреза 5 в южном направлении Каттакурганского водохранилища

Fig. 6. Morphological features of section 5 in the southern direction of the Kattakurgan reservoir

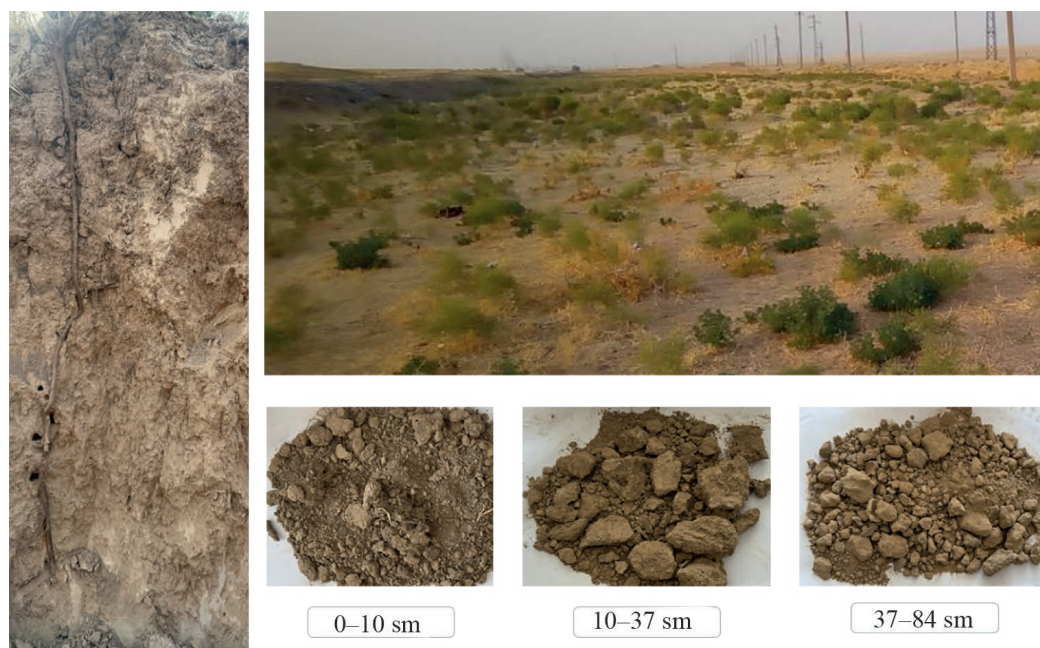


Рис. 7. Морфологические признаки разреза 5 в западном направлении Каттакурганского водохранилища

Fig. 7. Morphological features of section 5 in the western direction of the Kattakurgan reservoir

Из приведенных выше исследований следует, что почвы вокруг водохранилища подверглись различным воздействиям, при этом изменения ее морфологических признаков и растительного покрова в большей степени наблюдаются на северной стороне.

В ходе работ в полевых условиях были изучены факторы, способствующие формированию процесса гидроморфизма в почвенном покрове вокруг Каттакурганского водохранилища (табл.).

Причины проявления гидроморфизма почв вокруг Каттакурганского водохранилища

Reasons for the manifestation of soil hydromorphism around the Kattakurgan reservoir

Тип гидроморфизма	Условия гидроморфизма	Механизм проявления	Причины проявления процесса гидроморфизма
В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЗОНЕ			
Естественный	Климатические условия	Большое количество осадков (поступление влаги в почву превышает испарение)	Не наблюдается
		Длительное удерживание дождевых вод в почвенных горизонтах	Не наблюдается
		Кратковременные, но интенсивные ливни	Не наблюдается
	Высокий уровень грунтовых вод	Близкое залегание грунтовых вод к поверхности	Наблюдается на территории до 3 км
		Ускорение окислительно-восстановительных реакций в грунтовых водах, формирование глеевых почв	Наблюдается на территории до 3 км
		Перемещение оксидов железа и марганца, дефицит кислорода и длительное разложение органических веществ	Наблюдается на территории до 3 км
	Геоморфологические особенности (рельеф)	В понижениях, долинах, болотах, вблизи водохранилищ и озер происходит скопление воды и процесс гидроморфизма выражен сильнее	Наблюдается
		В рельефах с низинами и плохо сформированной дренажной системой	Наблюдается отчетливо
	Сточный режим и дренажная система	Естественная слабость водного стока	Наблюдается
		Отсутствие или недостаточная работа дренажных систем	Наблюдается
		В поймах рек и вокруг озер наблюдаются периодические затопления	Не наблюдается
		При сильных осадках растения не успевают быстро испарять влагу	Не наблюдается
Антропогенные причины, связанные с деятельностью человека	Неправильное орошение и ирригация	Несоответствующая система орошения	Не наблюдается
		Длительное накопление воды	Не наблюдается
	Недостаточность дренажной системы	Недостаточное внедрение дренажной системы	Встречается в некоторых местах
		Снижение уровня транспирации в результате массовой вырубki деревьев	Не наблюдается
	Строительство и урбанизация	Строительство дорог, зданий и промышленных предприятий	Не наблюдается
Естественный	Климатические условия	Засоление и заболачивание почв вследствие неправильного управления оросительными водами	Не наблюдается
		Засоление и заболачивание почв вследствие неправильного управления оросительными водами	Не наблюдается
		Засоление и заболачивание почв вследствие неправильного управления оросительными водами	Не наблюдается
	Климатические условия	Большое количество осадков (поступление влаги в почву превышает испарение)	Не наблюдается
		Длительное удерживание дождевых вод в почвенных горизонтах	Не наблюдается
Естественный	Климатические условия	Кратковременные, но интенсивные ливни	Не наблюдается

Продолжение табл.

Continue table

Тип гидроморфизма	Условия гидроморфизма	Механизм проявления	Причины проявления процесса гидроморфизма
В СЕВЕРНОЙ ЗОНЕ			
Естественный	Высокий уровень грунтовых вод	Близкое залегание грунтовых вод к поверхности	Наблюдается на территории до 2 км
		Ускорение окислительно-восстановительных реакций в грунтовых водах, формирование глеевых почв	Наблюдается на территории до 2 км
		Перемещение оксидов железа и марганца, дефицит кислорода и длительное разложение органических веществ	Наблюдается на территории до 2 км
	Геоморфологические особенности (рельеф)	В понижениях, долинах, болотах, вблизи водохранилищ и озер происходит скопление воды и процесс гидроморфизма выражен сильнее	Наблюдается
		В рельефах с низинами и плохо сформированной дренажной системой	Наблюдается
	Сточный режим и дренажная система	Естественная слабость водного стока	Наблюдается
		Отсутствие или недостаточная работа дренажных систем	Наблюдается
		В поймах рек и вокруг озер наблюдаются периодические затопления	Не наблюдается
		При сильных осадках растения не успевают быстро испарять влагу	Не наблюдается
	Растительный покров и транспирация	Влияние влаголюбивых растений (например, тростника), снижающих содержание кислорода в почве	Наблюдается на территории до 1,5 км
		Чрезмерное использование воды в сельском хозяйстве приводит к накоплению избыточной влаги и заболачиванию	Не наблюдается
Антропогенные причины, связанные с деятельностью человека	Неправильное орошение и ирригация	Несоответствующая система орошения	Не наблюдается
		Длительное накопление воды	Не наблюдается
	Недостаточность дренажной системы	Недостаточное внедрение дренажной системы	Встречается в некоторых местах
	Строительство и урбанизация	Снижение уровня транспирации в результате массовой вырубки деревьев	Не наблюдается
		Строительство дорог, зданий и промышленных предприятий	Не наблюдается
	Заболачивание и засоление земель	Засоление и заболачивание почв вследствие неправильного управления оросительными водами	Не наблюдается
В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЗОНЕ			
Естественный	Климатические условия	Большое количество осадков (поступление влаги в почву превышает испарение)	Не наблюдается
		Длительное удерживание дождевых вод в почвенных горизонтах	Не наблюдается
		Кратковременные, но интенсивные ливни	Не наблюдается
	Высокий уровень грунтовых вод	Близкое залегание грунтовых вод к поверхности	Наблюдается на территории до 0,8 км
		Ускорение окислительно-восстановительных реакций в грунтовых водах, формирование глеевых почв	Наблюдается на территории до 0,8 км
		Перемещение оксидов железа и марганца, дефицит кислорода и длительное разложение органических веществ	Наблюдается на территории до 0,8 км

Продолжение табл.

Continue table

Тип гидроморфизма	Условия гидроморфизма	Механизм проявления	Причины проявления процесса гидроморфизма
Естественный	Геоморфологические особенности (рельеф)	В понижениях, долинах, болотах, вблизи водохранилищ и озер происходит скопление воды и процесс гидроморфизма выражен сильнее	Наблюдается на территории до 0,8 км
		В рельефах с низинами и плохо сформированной дренажной системой	Не наблюдается
	Сточный режим и дренажная система	Естественная слабость водного стока.	Наблюдается
		Отсутствие или недостаточная работа дренажных систем	Наблюдается
		В поймах рек и вокруг озер наблюдаются периодические затопления	Не наблюдается
		При сильных осадках растения не успевают быстро испарять влагу	Не наблюдается
	Растительный покров и транспирация	Влияние влаголюбивых растений (например, тростника), снижающих содержание кислорода в почве	Наблюдается на территории до 2 км
		Чрезмерное использование воды в сельском хозяйстве приводит к накоплению избыточной влаги и заболачиванию	Не наблюдается
Антропогенные причины, связанные с деятельностью человека	Неправильное орошение и ирригация	Несоответствующая система орошения	Не наблюдается
		Длительное накопление воды	Не наблюдается
	Недостаточность дренажной системы	Недостаточное внедрение дренажной системы	Встречается в некоторых местах
	Строительство и урбанизация	Снижение уровня транспирации в результате массовой вырубки деревьев	Не наблюдается
		Строительство дорог, зданий и промышленных предприятий	Не наблюдается
	Заболачивание и засоление земель	Засоление и заболачивание почв вследствие неправильного управления оросительными водами	Не наблюдается
В ВОСТОЧНОЙ ЗОНЕ			
Естественный	Климатические условия	Большое количество осадков (поступление влаги в почву превышает испарение)	Не наблюдается
		Длительное удерживание дождевых вод в почвенных горизонтах	Не наблюдается
		Кратковременные, но интенсивные ливни	Не наблюдается
	Высокий уровень грунтовых вод	Близкое залегание грунтовых вод к поверхности	Не наблюдается
		Ускорение окислительно-восстановительных реакций в грунтовых водах, формирование глеевых почв	Не наблюдается
		Перемещение оксидов железа и марганца, дефицит кислорода и длительное разложение органических веществ	Не наблюдается
	Геоморфологические особенности (рельеф)	В понижениях, долинах, болотах, вблизи водохранилищ и озер происходит скопление воды и процесс гидроморфизма выражен сильнее	Не наблюдается
		В рельефах с низинами и плохо сформированной дренажной системой	Не наблюдается
	Сточный режим и дренажная система	Естественная слабость водного стока	Не наблюдается
		Отсутствие или недостаточная работа дренажных систем	Не наблюдается
		В поймах рек и вокруг озер наблюдаются периодические затопления	Не наблюдается
		При сильных осадках растения не успевают быстро испарять влагу	Не наблюдается
	Растительный покров и транспирация	Влияние влаголюбивых растений (например, тростника), снижающих содержание кислорода в почве	Не наблюдается
		Чрезмерное использование воды в сельском хозяйстве приводит к накоплению избыточной влаги и заболачиванию	Не наблюдается

Продолжение табл.

Continue table

Тип гидроморфизма	Условия гидроморфизма	Механизм проявления	Причины проявления процесса гидроморфизма
Антропогенные причины, связанные с деятельностью человека	Неправильное орошение и ирригация	Несоответствующая система орошения	Не наблюдается
		Длительное накопление воды	Не наблюдается
	Недостаточность дренажной системы	Недостаточное внедрение дренажной системы	Богарные земли
	Строительство и урбанизация	Снижение уровня транспирации в результате массовой вырубки деревьев	Не наблюдается
		Строительство дорог, зданий и промышленных предприятий	Не наблюдается
	Заболачивание и засоление земель	Засоление и заболачивание почв вследствие неправильного управления оросительными водами	Богарные земли
В ЮЖНОЙ ЗОНЕ			
Естественный	Климатические условия	Большое количество осадков (поступление влаги в почву превышает испарение)	Не наблюдается
		Длительное удерживание дождевых вод в почвенных горизонтах	Не наблюдается
		Кратковременные, но интенсивные ливни	Не наблюдается
	Высокий уровень грунтовых вод	Близкое залегание грунтовых вод к поверхности	Не наблюдается
		Ускорение окислительно-восстановительных реакций в грунтовых водах, формирование глеевых почв	Не наблюдается
		Перемещение оксидов железа и марганца, дефицит кислорода и длительное разложение органических веществ	Не наблюдается
	Геоморфологические особенности (рельеф)	В понижениях, долинах, болотах, вблизи водохранилищ и озер происходит скопление воды и процесс гидроморфизма выражен сильнее	Не наблюдается
		В рельефах с низинами и плохо сформированной дренажной системой	Не наблюдается
	Сточный режим и дренажная система	Естественная слабость водного стока	Не наблюдается
		Отсутствие или недостаточная работа дренажных систем	Не наблюдается
		В поймах рек и вокруг озер наблюдаются периодические затопления	Не наблюдается
		При сильных осадках растения не успевают быстро испарять влагу	Не наблюдается
	Растительный покров и транспирация	Влияние влаголюбивых растений (например, тростника), снижающих содержание кислорода в почве	Не наблюдается
		Чрезмерное использование воды в сельском хозяйстве приводит к накоплению избыточной влаги и заболачиванию	Не наблюдается
Антропогенные причины, связанные с деятельностью человека	Неправильное орошение и ирригация	Несоответствующая система орошения	Не наблюдается
		Длительное накопление воды	Не наблюдается
	Недостаточность дренажной системы	Недостаточное внедрение дренажной системы	Богарные земли
	Строительство и урбанизация	Снижение уровня транспирации в результате массовой вырубки деревьев	Не наблюдается
		Строительство дорог, зданий и промышленных предприятий	Не наблюдается
	Заболачивание и засоление земель	Засоление и заболачивание почв вследствие неправильного управления оросительными водами	Не наблюдается
В ЗАПАДНОЙ ЗОНЕ			
Естественный	Климатические условия	Большое количество осадков (поступление влаги в почву превышает испарение)	Не наблюдается
		Длительное удерживание дождевых вод в почвенных горизонтах	Не наблюдается
		Кратковременные, но интенсивные ливни	Не наблюдается

Окончание табл.

Ending table

Тип гидроморфизма	Условия гидроморфизма	Механизм проявления	Причины проявления процесса гидроморфизма
Естественный	Высокий уровень грунтовых вод	Близкое залегание грунтовых вод к поверхности	Не наблюдается
		Ускорение окислительно-восстановительных реакций в грунтовых водах, формирование глеевых почв	Не наблюдается
		Перемещение оксидов железа и марганца, дефицит кислорода и длительное разложение органических веществ	Не наблюдается
	Геоморфологические особенности (рельеф)	В понижениях, долинах, болотах, вблизи водохранилищ и озер происходит скопление воды и процесс гидроморфизма выражен сильнее	Не наблюдается
		В рельефах с низинами и плохо сформированной дренажной системой	Не наблюдается
	Сточный режим и дренажная система	Естественная слабость водного стока	Не наблюдается
		Отсутствие или недостаточная работа дренажных систем	Не наблюдается
		В поймах рек и вокруг озер наблюдаются периодические затопления	Не наблюдается
		При сильных осадках растения не успевают быстро испарять влагу	Не наблюдается
	Растительный покров и транспирация	Влияние влаголюбивых растений (например, тростника), снижающих содержание кислорода в почве	Не наблюдается
		Чрезмерное использование воды в сельском хозяйстве приводит к накоплению избыточной влаги и заболачиванию	Не наблюдается
Антропогенные причины, связанные с деятельностью человека	Неправильное орошение и ирригация	Несоответствующая система орошения	Не наблюдается
		Длительное накопление воды	Не наблюдается
	Недостаточность дренажной системы	Недостаточное внедрение дренажной системы	Богарные земли
	Строительство и урбанизация	Снижение уровня транспирации в результате массовой вырубки деревьев	Не наблюдается
		Строительство дорог, зданий и промышленных предприятий	Не наблюдается
	Заболачивание и засоление земель	Засоление и заболачивание почв вследствие неправильного управления оросительными водами	Не наблюдается

Из вышеизложенного анализа следует, что в формировании гидроморфизма почв вокруг Каттакурганского водохранилища, появлении болотных горизонтов и изменении морфологии почв рельеф играет важную роль. Влияние водохранилища на почвы наблюдается на северной, северо-западной и северо-восточной сторонах, тогда как на восточной, южной и западной сторонах оно не выявлено, процессы гидроморфизма в почвах не обнаружены. Основная причина заключается в том, что восточная, южная и западная стороны расположены на 20–25 м выше уровня моря по сравнению с северной стороной, представлены богарными землями и не используются в сельском хозяйстве. Северная же часть расположена ниже других. Именно здесь размещены входные и выходные каналы водохранилища, а также активно используются орошаемые земли. Влияние водохранилища на почвенный покров северной стороны также неравномерно. Согласно результатам, наибольшее поднятие грунтовых вод наблюдается в северо-западной части, и этот эффект проявляется на расстоянии до 3–3,5 км от водохранилища; в северо-восточной части влияние прослеживается до 2 км, а в северной – до 1,7 км.

Формирование гидроморфизма, засоление почв, изменение растительного покрова и содержание гумуса в почвах вокруг Каттакурганского водохранилища определяются как природными, так и антропогенными факторами, однако влияние антропогенных факторов выше. Это связано с недостаточной эффективностью коллекторно-дренажной системы и неправильными подходами при возделывании сельскохозяйственных культур.

Заключение

Под воздействием деятельности Каттакурганского водохранилища наблюдается развитие гидроморфизма в почвах прилегающей территории. Однако влияние водоема на почвы неоднородно: основное поднятие грунтовых вод происходит на северной стороне, тогда как на восточной, южной и западной сторонах оно выражено очень слабо. Причина в том, что восточная, южная и западная стороны расположены на 20–25 м выше северной и представляют собой богарные земли, которые не используются в хозяйственной деятельности. Здесь изменения растительного покрова и морфологии почвенного профиля незначительны.

На северной стороне процесс гидроморфизма имеет выраженные различия: наибольшее воздействие наблюдается на северо-западе, где уровень грунтовых вод фиксирован на глубине 82 см, что приводит к выраженному оглеению и заболачиванию. На северо-востоке и севере уровень грунтовых вод располагается на глубине 1–2 м. Различия в проявлении гидроморфизма на северной стороне объясняются проведением мелиоративных мероприятий в фермерских хозяйствах, а также контролем работы дренажной системы для поддержания уровня грунтовых вод ниже 1,5 м.

Результаты исследований подтверждают, что влияние грунтовых вод на северной стороне прослеживается до 3 км. При эффективной работе дренажной системы его можно снизить до 1 км, что создаст условия для накопления органического вещества в почве, повышения подвижности питательных элементов и улучшения водного и воздушного режимов.

Библиографические ссылки

1. Белозерцева ИА, Воробьева ИБ, Власова НВ, Лопатина ДН. Трансформация почв побережья Иркутского водохранилища и оз. Байкал (в пределах Иркутской области) в результате влияния колебаний уровня водоемов. *Природа Внутренней Азии*. 2023;1(23):18–48.
2. Гарькуша ДН, Фёдоров ЮА, Косолапов АЕ, Усова ЕВ, Анпилова ЕЛ. Анализ факторов формирования концентраций и эмиссионных потоков метана в водохранилищах. *Антропогенная трансформация природной среды*. 2024;10(1):37–50. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-37-50>.
3. Jia YY, Dua HF & Ya, XF. Effect of Hydro-geomorphological Environments on Surface Water Areas Extraction. *Water Resour Manage*. 2025;8. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04212-8>
4. Francis Henrique Tenório Firmino, João Carlos Ker, Maurício Paulo Ferreira Fontes, Hidelbandi Farias de Melo, Jaime Wilson Vargas de Mello, Luiz Felipe Mesquita Acid Sulfate Soils and Their Impact on Surface Water Quality: A Case Study in Southeast Brazil. *European Journal of Soil Science*. 2025;76(3):e70115.
5. Salmi A, Baghdadi ME, Hilali A, et al. Assessing the relationship between iron behavior and phosphorus in hydromorphic soils: the day Valley case, Tadla Plain, Morocco. *Mediterranean Geoscience Reviews*. 2025;7:379–393. <https://doi.org/10.1007/s42990-025-00165-7>.
6. Ayala Izurieta JE, Jara Santillán CA, Márquez CO, et al. Improving the remote estimation of soil organic carbon in complex ecosystems with Sentinel-2 and GIS using Gaussian processes regression. *Plant Soil*. 2022;479:159–183. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05506-1>.
7. Bhat MA, Mishra AK, Shah SN, et al. Soil and mineral nutrients in plant health: a prospective study of iron and phosphorus in the growth and development of plants. *Current Issues in Molecular Biology*. 2024;46:5194–5222. <https://doi.org/10.3390/cimb46060312>.
8. Gojiya KM, Rank HD, Chauhan PM, et al. Remote sensing and GIS applications in soil salinity analysis: a comprehensive review. *International Journal of Environment and Climate Change*. 2023;13:2149–2161. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i113377>.
9. Hilali A, Baghdadi M, Hamzaoui EH. GIS and AHP multi-criteria analysis methods for the quality assessment of agricultural soils irrigated with wastewater: case of the Day River, Beni Mellal (Morocco). *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;22(14):2388. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08654-3>.
10. Jalhoum MEM, Abdellatif MA, Mohamed ES, et al. Multivariate analysis and GIS approaches for modeling and mapping soil quality and land suitability in arid zones. *Heliyon*. 2024;10:e27577. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024>.
11. Kermeur N, Pédrot M, Cabello-Hurtado F. Iron Availability and Homeostasis in Plants: A Review of Responses, Adaptive Mechanisms, and Signaling. In: Couée I, editor. *Plant Abiotic Stress Signaling*. New York: Springer; 2023. p. 49–81. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3044-0_3.
12. Kraal P, van Genuchten CM, Behrends T. Phosphate coprecipitation affects reactivity of iron (oxyhydr) oxides towards dissolved iron and sulfide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2022;321:311–328. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.12.032>.
13. Truskavetskiy R, Zubkovskaya V, Khyzhniak I, Palamar N. Specificity of Processes in Hydromorphic Soils. In: Dmytruk Y, Dent D (eds) *Soils Under Stress: More Work for Soil Science in Ukraine*. Cham: Springer International Publishing; 2021. p. 69–78. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68394-8_7.
14. Belozertseva IA, Vorobyeva IB & Vlasova NV Soil Transformation along the Coast of Baikal Due to Lake Level Fluctuations (Irkutsk Oblast). *Geography and Natural Resources*. 2023;44:238–252. <https://doi.org/10.1134/S1875372823030022>.
15. Raimundo Jiménez-Ballesta, Francisco J. San José, Jorge Mongil-Manso, Laura Escudero-Campos, María P. Álvarez-Castellanos Properties of Waterlogged Soils Developed on Arkose and Aeolian Sands in an Agro-Silvopastoral System. *European Journal of Soil Science*. 2025;76(1):e70055. <https://doi.org/10.1111/ejss.70055>.
16. Yiguo Ran, Peng Wang, Fei Ye, Junfeng Qu, Yang Ning, Yanshuo Zhang, Zhaoferi Wen, Shengjun Wu, Ping Huang Patterns and drivers of organic carbon in hydromorphic soils across inland aquatic-terrestrial ecotones at the global scale. *Catena*. 2024;244:108–266. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108266>.
17. ISO 25177:2020. Soil quality — Field soil description. International Organization for Standardization. Geneva: [publisher unknown]; 2020.

18. ISO 10381-2:2002. Soil quality — Sampling — Part 2: Guidance on sampling techniques. International Organization for Standardization. Geneva: [publisher unknown]; 2002.
19. Likhanova IA, Deneva SV, Kholopov YV, Kuznetsova EG, Shakhtarova OV, Lapteva EM. The Effect of Hydromorphism on Soils and Soil Organic Matter during the Primary Succession Processes of Forest Vegetation on Ancient Alluvial Sands of the European North-East of Russia. *Forests*. 2022; 13(2):230. <https://doi.org/10.3390/f13020230>.
20. Ni Y, et al. Spatial and temporal evolution and factors influencing soil aggregate stability in the riparian zone during exposure: A case study of the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of The Total Environment*. 2024;957:177408. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177408>.
21. Sun X, Liu S, Tang H, Zhang F, Jia L, Li C, Ma L, Liu J, Jiang K, Ding Z, et al. Effects of Water-Level Fluctuation on Soil Aggregates and Aggregate-Associated Organic Carbon in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Land*. 2024;13(3):313. <https://doi.org/10.3390/land13030313>.
22. Qin D, Li S, Wang J, Wang D, Liao P, Wang Y, Zhu Z, Dai Z, Jin Z, Hu X, Qiu S, Ma Y, Chen J. Spatial variation of soil phosphorus in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir: Coupling effects of elevation and artificial restoration. *Science of The Total Environment*. 2023;905:167000. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167000>.
23. Qin J, et al. How have the drawdown zones of large reservoirs changed globally? *Ecological Engineering*. 2025;10:102–260. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025>.
24. Lv J, et al. Elevation-related variations of soil disintegration and its driving forces in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Geomorphology*. 2024;10:109–193. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024>.
25. Lewis ASL, et al. Reservoir drawdown highlights the emergent effects of water level change on reservoir physics, chemistry, and biology. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2024;129:77–80. DOI: 10.1029/2023JG007780.
26. Ran Y, Li Y, Zhang Q, et al. Patterns and drivers of organic carbon in hydromorphic soils across inland aquatic-terrestrial ecotones at the global scale. *Catena*. 2024;7409:108266. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108266>.
27. Sun X, Liu S, Tang H, Zhang F, Jia L, Li C, Ma L, Liu J, Jiang K, Ding Z, et al. Effects of Water-Level Fluctuation on Soil Aggregates and Aggregate-Associated Organic Carbon in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Land*. 2024;13(3):313. <https://doi.org/10.3390/land13030313>.
28. Naz F, et al. Seasonal dynamics of soil ecosystems in the riparian zones of the Three Gorges Reservoir, China. *Global Ecology and Conservation*. 2024;54:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03174>.
29. Zhang S, et al. Decreased stability of soil dissolved organic matter under disturbance of periodic flooding and drying in a reservoir drawdown area. *Science of the Total Environment*. 2025;969:178343. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178343>.
30. Zhang X, Zhu B. Changes of riparian soil-plant system phosphorus responding to hydrological alternations of Three Gorges Reservoir. *Scientific Reports*. 2025;15(1):5629. doi: 10.1038/s41598-025-85942-y. PMID: 39955283; PMCID: PMC11829974.
31. Su Y, et al. Methane emission from water-level fluctuation zone: Seasonal variation and microbial mechanism. *Science of the Total Environment*. 2024;912:168935. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168935>.
32. Новикова НМ, Кузьмина ЖВ, Мамутов НК. Опустынивание дельты Амударьи и динамика растительности в условиях Аральского кризиса. *Аридные экосистемы*. 2023;4(97):4–20.
33. Абдуллаев СА, Жаббаров ЗА, Турсунова АБ, Околелова АА, Холдоров ШМ. Изменение мелиоративного состояния почв, распространенных вокруг Каттакурганского водохранилища. *Живые и биокосные системы*. 2019;28:7. DOI: 10.18522/2308-9709-2019-28-7.
34. Курвантаев Р, Мазиров МА, Солиева НА, Хакимова НХ. Эволюция и прогноз развития орошаемых типичных и светлых сероземов на третьей террасе реки Зарафшан. *Владимирский земледелец*. 2021;4:98.

References

1. Belozertseva IA, Vorobyova IB, Vlasova NV, Lopatina DN. *Transformatsiya pochv poberej'ya Irkutskogo vodoxraniliya i oz. Baykal (v predelakh Irkutskoy oblasti) v rezultate vliyaniya kolebaniy urovnya vodoemov* [Transformation of soils of the coast of the Irkutsk Reservoir and Lake Baikal (within the Irkutsk region) as a result of the influence of water level fluctuations]. *Nature of Inner Asia*. 2023;1(23):18–48. Russian.
2. Garkusha DN, Fedorov YuA, Kosolapov AE, Usova EV, Anpilova EL. *Analiz faktorov formirovaniya kontsentratsiy i emissionnykh potokov metana v vodoxranilishchakh* [Analysis of factors forming concentrations and emission fluxes of methane in reservoirs]. *Anthropogenic transformation of the natural environment*. 2024;10(1):37–50. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-37-50>. Russian.
3. Jia YY, Dua HF & Ya, XF. Effect of Hydro-geomorphological Environments on Surface Water Areas Extraction. *Water Resour Manage*. 2025;8. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04212-8>
4. Francis Henrique Tenório Firmino, João Carlos Ker, Maurício Paulo Ferreira Fontes, Hidelbandi Farias de Melo, Jaime Wilson Vargas de Mello, Luiz Felipe Mesquita Acid Sulfate Soils and Their Impact on Surface Water Quality: A Case Study in Southeast Brazil. *European Journal of Soil Science*. 2025;76(3):e70115.
5. Salmi A, Baghdadi ME, Hilali A, et al. Assessing the relationship between iron behavior and phosphorus in hydromorphic soils: the day Valley case, Tadla Plain, Morocco. *Mediterranean Geoscience Reviews*. 2025;7:379–393. <https://doi.org/10.1007/s42990-025-00165-7>.
6. Ayala Izurieta JE, Jara Santillán CA, Márquez CO, et al. Improving the remote estimation of soil organic carbon in complex ecosystems with Sentinel-2 and GIS using Gaussian processes regression. *Plant Soil*. 2022;479:159–183. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05506-1>.
7. Bhat MA, Mishra AK, Shah SN, et al. Soil and mineral nutrients in plant health: a prospective study of iron and phosphorus in the growth and development of plants. *Current Issues in Molecular Biology*. 2024;46:5194–5222. <https://doi.org/10.3390/cimb46060312>.
8. Gojiya KM, Rank HD, Chauhan PM, et al. Remote sensing and GIS applications in soil salinity analysis: a comprehensive review. *International Journal of Environment and Climate Change*. 2023;13:2149–2161. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i113377>.
9. Hilali A, Baghdadi M, Hamzaoui EH. GIS and AHP multi-criteria analysis methods for the quality assessment of agricultural soils irrigated with wastewater: case of the Day River, Beni Mellal (Morocco). *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;22(14):2388. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08654-3>.

10. Jalhoun MEM, Abdellatif MA, Mohamed ES, et al. Multivariate analysis and GIS approaches for modeling and mapping soil quality and land suitability in arid zones. *Heliyon*. 2024;10:e27577. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024>.
11. Kermeur N, Pédrot M, Cabello-Hurtado F. Iron Availability and Homeostasis in Plants: A Review of Responses, Adaptive Mechanisms, and Signaling. In: Couée I, editor. *Plant Abiotic Stress Signaling*. New York: Springer; 2023. p. 49–81. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3044-0_3.
12. Kraal P, van Genuchten CM, Behrends T. Phosphate coprecipitation affects reactivity of iron (oxyhydr) oxides towards dissolved iron and sulfide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2022;321:311–328. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.12.032>.
13. Truskavetskiy R, Zubkovskaya V, Khyzhniak I, Palamar N. Specificity of Processes in Hydromorphic Soils. In: Dmytruk Y, Dent D (eds) *Soils Under Stress: More Work for Soil Science in Ukraine*. Cham: Springer International Publishing; 2021. p. 69–78. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68394-8_7.
14. Belozertseva IA, Vorobyeva IB & Vlasova NV Soil Transformation along the Coast of Baikal Due to Lake Level Fluctuations (Irkutsk Oblast). *Geography and Natural Resources*. 2023;44:238–252. <https://doi.org/10.1134/S1875372823030022>.
15. Raimundo Jiménez-Ballesta, Francisco J. San José, Jorge Mongil-Manso, Laura Escudero-Campos, María P. Álvarez-Castellanos Properties of Waterlogged Soils Developed on Arkose and Aeolian Sands in an Agro-Silvopastoral System. *European Journal of Soil Science*. 2025;76(1):e70055. <https://doi.org/10.1111/ejss.70055>.
16. Yiguo Ran, Peng Wang, Fei Ye, Junfeng Qu, Yang Ning, Yanshuo Zhang, Zhaofei Wen, Shengjun Wu, Ping Huang Patterns and drivers of organic carbon in hydromorphic soils across inland aquatic-terrestrial ecotones at the global scale. *Catena*. 2024;244:108–266. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108266>.
17. ISO 25177:2020. Soil quality — Field soil description. International Organization for Standardization. Geneva: [publisher unknown]; 2020.
18. ISO 10381-2:2002. Soil quality — Sampling — Part 2: Guidance on sampling techniques. International Organization for Standardization. Geneva: [publisher unknown]; 2002.
19. Likhonova IA, Deneva SV, Kholopov YV, Kuznetsova EG, Shakhtarova OV, Lapteva EM. The Effect of Hydromorphism on Soils and Soil Organic Matter during the Primary Succession Processes of Forest Vegetation on Ancient Alluvial Sands of the European North-East of Russia. *Forests*. 2022; 13(2):230. <https://doi.org/10.3390/f13020230>.
20. Ni Y, et al. Spatial and temporal evolution and factors influencing soil aggregate stability in the riparian zone during exposure: A case study of the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of The Total Environment*. 2024;957:177408. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177408>.
21. Sun X, Liu S, Tang H, Zhang F, Jia L, Li C, Ma L, Liu J, Jiang K, Ding Z, et al. Effects of Water-Level Fluctuation on Soil Aggregates and Aggregate-Associated Organic Carbon in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Land*. 2024;13(3):313. <https://doi.org/10.3390/land13030313>.
22. Qin D, Li S, Wang D, Liao P, Wang Y, Zhu Z, Dai Z, Jin Z, Hu X, Qiu S, Ma Y, Chen J. Spatial variation of soil phosphorus in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir: Coupling effects of elevation and artificial restoration. *Science of The Total Environment*. 2023;905:167000. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167000>.
23. Qin J, et al. How have the drawdown zones of large reservoirs changed globally? *Ecological Engineering*. 2025;10:102–260. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025>.
24. Lv J, et al. Elevation-related variations of soil disintegration and its driving forces in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Geomorphology*. 2024;10:109–193. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024>.
25. Lewis ASL, et al. Reservoir drawdown highlights the emergent effects of water level change on reservoir physics, chemistry, and biology. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2024;129:77–80. DOI: 10.1029/2023JG007780.
26. Ran Y, Li Y, Zhang Q, et al. Patterns and drivers of organic carbon in hydromorphic soils across inland aquatic-terrestrial ecotones at the global scale. *Catena*. 2024;7409:108266. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108266>.
27. Sun X, Liu S, Tang H, Zhang F, Jia L, Li C, Ma L, Liu J, Jiang K, Ding Z, et al. Effects of Water-Level Fluctuation on Soil Aggregates and Aggregate-Associated Organic Carbon in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Land*. 2024;13(3):313. <https://doi.org/10.3390/land13030313>.
28. Naz F, et al. Seasonal dynamics of soil ecosystems in the riparian zones of the Three Gorges Reservoir, China. *Global Ecology and Conservation*. 2024;54:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03174>.
29. Zhang S, et al. Decreased stability of soil dissolved organic matter under disturbance of periodic flooding and drying in a reservoir drawdown area. *Science of the Total Environment*. 2025;969:178343. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178973>.
30. Zhang X, Zhu B. Changes of riparian soil-plant system phosphorus responding to hydrological alternations of Three Gorges Reservoir. *Scientific Reports*. 2025;15(1):5629. doi: 10.1038/s41598-025-85942-y. PMID: 39955283; PMCID: PMC11829974.
31. Su Y, et al. Methane emission from water-level fluctuation zone: Seasonal variation and microbial mechanism. *Science of the Total Environment*. 2024;912:168935. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168935>.
32. Novikova NM, Kuzmina ZhV, Mamutov NK. *Opustynivaniye del'ny Amudar' i dinamika rastitel'nosti v usloviyakh Aral'skogo krizisa* [Desertification of the Amu Darya Delta and Vegetation Dynamics under the Aral Sea Crisis]. *Arid Ecosystems*. 2023;4(97):4–20. Russian.
33. Abdullaev SA, Zhabbarov ZA, Tursunova AB, Okolelova AA, Kholdorov ShM. *Izmeneniye meliorativnogo sostoyaniya pochv, rasprostranennykh vokrug Kattakurganskogo vodokhranilishcha* [Changes in the meliorative state of soils distributed around the Kattakurgan reservoir]. *Living and bioinert systems*. 2019;28:7. DOI: 10.18522/2308-9709-2019-28-7. Russian.
34. Kurvantaev R, Mazirov MA, Solieva NA, Khakimova NK. *Evolutsiya i prognoz razvitiya oroshayemykh tipichnykh i svetlykh serozomov na tret'ey terrace reki Zarafshan* [Evolution and forecast of the development of irrigated typical and light sierozems on the third terrace of the Zarafshan River]. *Vladimirskij zemledelets*. 2021;4:98. Russian.

Статья поступила в редколлегию 19.08.2025.
Received by editorial board 19.08.2025.

ДИНАМИКА НАКОПЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ СВИНЦА И МЕДИ В СИСТЕМЕ «ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ – ДВУСТВОРЧАТЫЕ МОЛЛЮСКИ»

Т. В. МАКАРЕНКО¹⁾, О. В. ПЫРХ¹⁾, А. В. ХАДАНОВИЧ¹⁾, А. И. МАКАРЕНКО²⁾

¹⁾Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
ул. Советская, 104, 246028, г. Гомель, Беларусь

²⁾Гомельский государственный медицинский университет,
ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Беларусь

Содержание соединений свинца в донных отложениях практически всех изучаемых водных экосистем в 2019 г. снизилось по сравнению с 2010 г. в 1,1–22,7 раза, содержание меди – в 1,2–7,6 раза. Причиной уменьшения содержания металлов в донных отложениях исследуемых водоемов является снижение антропогенной нагрузки на водные экосистемы изучаемых территорий. Отмечено значительное уменьшение концентрации соединений свинца и меди в донных отложениях водоемов, принимающих либо стоки предприятий, либо стоки с территории городских предприятий. На протяжении 2019–2021 гг. содержание свинца и меди в отложениях водоемов продолжало снижаться в 1,1–6,5 раза за счет перехода соединений металлов в подвижные формы, которые поглощаются биотой или уносятся течением. В 2019 г. содержание свинца в тканях моллюсков снизилось в 5 раз по сравнению с величинами, полученными в 2010 г., но в дальнейшем в 2020 и 2021 гг. концентрация свинца однонаправленно увеличилась. Повышение содержания свинца в тканях моллюсков в 2019–2021 гг. свидетельствует об увеличении биологической доступности форм металлов в донных отложениях, так как поступление свинца в окружающую среду значительно снизилось. Разница в содержании меди в тканях моллюсков в 2010 и 2019 гг. составила 12,0 раз в сторону снижения. В 2020 г. концентрация меди снижалась, однако в 2021 г. отмечено увеличение содержания данного поллютанта в мягких тканях перловицы в 1,5 раза. Значения коэффициентов накопления свинца и меди по донным отложениям в мягких тканях перловицы изменялись в пределах 0,01–0,41 и увеличивались с 2019 по 2021 г. Для свинца ($r = 0,84–0,88$) и меди ($r = 0,62–0,89$) характерна высокая степень связи между концентрацией в донных отложениях и тканях моллюсков.

Ключевые слова: тяжелые металлы; перловица обыкновенная; донные отложения; водоемы; водотоки; медь; свинец; коэффициент накопления; коэффициент корреляции

Благодарность. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограмма 1 «Природные ресурсы и их рациональное использование», задание «Природные ресурсы и окружающая среда 1.02», тема «Комплексная оценка экологического состояния и выявление пространственно-временных изменений водных экосистем урбанизированных территорий (на примере юго-восточной части Беларуси)».

Образец цитирования:

Макаренко ТВ, Пырх ОВ, Хаданович АВ, Макаренко АИ. Динамика накопления соединений свинца и меди в системе «донные отложения – двустворчатые моллюски». *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;3:21–33.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-21-33>

For citation:

Makarenko TV, Pyrkh OV, Khadanovich AV, Makarenko AI. Dynamics of accumulation of lead and copper compounds in the system «bottom sediments – bivalve mollusks». *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;3:21–33. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-21-33>

Авторы:

Татьяна Викторовна Макаренко – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры химии.

Ольга Викторовна Пырх – старший преподаватель кафедры химии.

Альбина Викторовна Хаданович – кандидат химических наук, доцент; доцент кафедры химии.

Андрей Игоревич Макаренко – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры общей и биоорганической химии.

Authors:

Tatiana V. Makarenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of chemistry.

tmakarenko1968@bk.ru

Olga V. Pyrkh, senior lecturer at the department of chemistry.

korytko@gsu.by

Albina V. Khadanovich, PhD (chemistry), docent; associate professor at the department of chemistry.

hadanovich@gsu.by

Andrei I. Makarenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of general and bioorganic chemistry.

amakarenko198989@mail.ru

DYNAMICS OF ACCUMULATION OF LEAD AND COPPER COMPOUNDS IN THE SYSTEM «BOTTOM SEDIMENTS – BIVALVE MOLLUSKS»

T. V. MAKARENKO^a, O. V. PYRKH^a, A. V. KHADANOVICH^a, A. I. MAKARENKO^b

^aFrancysk Skaryna Gomel State University,
104 Saveckaya Street, Gomel 246028, Belarus

^bGomel State Medical University,
5 Lange Street, Gomel 246000, Belarus

Corresponding author: T. V. Makarenko (tmakarenko1968@bk.ru)

The content of lead compounds in the bottom sediments of almost all studied aquatic ecosystems in 2019 decreased by 1.1–22.7 times compared to 2010, the copper content – by 1.2–7.6 times. The reason for the decrease in the metal content in the bottom sediments of the studied reservoirs is the decrease in the anthropogenic load on the aquatic ecosystems of the studied territories. A significant decrease in the concentration of lead and copper compounds in the bottom sediments of reservoirs receiving either industrial wastewater or wastewater from the territory of city enterprises was noted. During 2019–2021, the content of lead and copper in the sediments of reservoirs continued to decrease by 1.1–6.5 times due to the transition of metal compounds into mobile forms, which are absorbed by biota or carried away by the current. In 2019, the lead content in the tissues of mollusks decreased by 5.0 times compared to the values obtained in 2010, but then in 2020 and 2021 the lead concentration increased in the same direction. The increase in the lead content in the tissues of mollusks in the period 2019–2021 indicates an increase in the bioavailability of metal forms in bottom sediments, since the lead input into the environment has significantly decreased. The difference in the copper content in the tissues of mollusks in 2010 and 2019 was 12.0 times downward. In 2020, the copper concentration decreased, but in 2021, an increase in the content of this pollutant in the soft tissues of the pearl mussel by 1.5 times was noted. The values of lead and copper accumulation coefficients in bottom sediments in the soft tissues of the pearl mussel varied within 0.01–0.41 and increased from 2019 to 2021. Lead ($r = 0.84–0.88$) and copper ($r = 0.62–0.89$) are characterized by a high degree of correlation between the concentration in bottom sediments and the tissues of mollusks.

Keywords: heavy metals; common barley; bottom sediments; water bodies; watercourses; copper; lead; accumulation coefficient; correlation coefficient.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the SPNI «Natural Resources and Environment», subprogram 1 «Natural Resources and their Rational Use», Task «Natural Resources and Environment 1.02», topic «Comprehensive assessment of the ecological state and identification of spatial and temporal changes in aquatic ecosystems of urbanized territories (on the example of the South-Eastern part of Belarus)».

Введение

В настоящее время в условиях сложившегося экологического состояния водных объектов Гомельского региона актуален вопрос использования водоемов урбанизированных территорий для отдыха населения, проведения культурно-массовых и спортивных мероприятий. Это требует комплексной оценки состояния водных и прибрежно-водных экосистем для прогноза последствий антропогенного воздействия и сохранения устойчивого функционирования прибрежно-водного комплекса.

Анализ состояния городских водоемов с использованием сопряженного изучения содержания загрязнителей в биотических и абиотических компонентах городских экосистем не только не носит системного характера, но и для многих из них не осуществляется, что требует выявления пространственно-временных закономерностей загрязнения прибрежно-водных и водных экосистем на урбанизированных территориях, проведения комплексной оценки загрязнения составляющих водных экосистем.

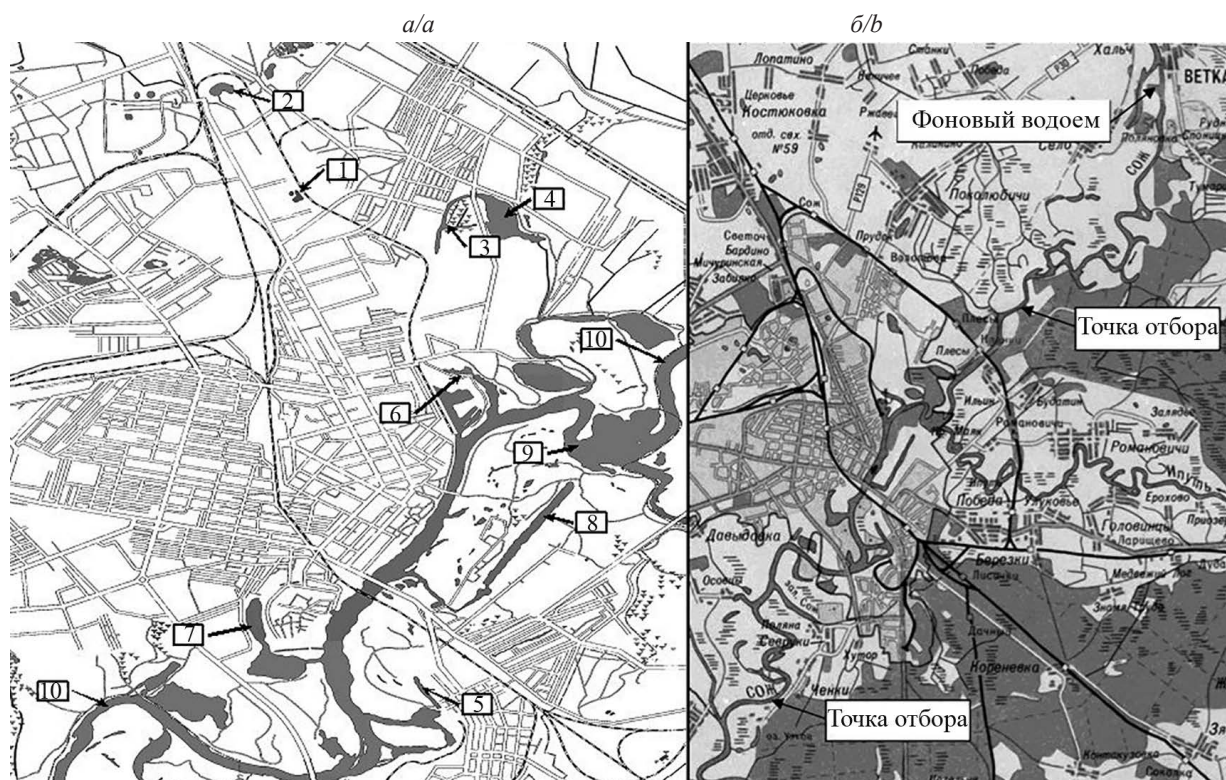
Важным направлением исследований является установление характера накопления тяжелых металлов некоторыми видами моллюсков с учетом конкретных особенностей территории и типом антропогенного воздействия. Немаловажный аспект исследования – возможность получить представление об источниках поступления загрязняющих веществ и особенностях их пространственно-временного распределения в водных и прибрежно-водных экосистемах. Для повышения результативности биогеохимической индикации слабозагрязненных водных экосистем необходимо использовать комплексный подход, включающий сопряженное изучение содержания тяжелых металлов в различных компонентах водоемов.

Цель исследования: установить особенности накопления свинца и меди донными отложениями и мягкими тканями перловицы, выявить зависимости между содержанием загрязнителей в донных отложениях и тканях некоторых видов моллюсков, произвести расчет коэффициентов перехода загрязнителей в системе «донные отложения – мягкие ткани моллюсков».

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны донные отложения водных экосистем г. Гомеля и прилегающих территорий, р. Сож, а также представитель класса двустворчатых моллюсков – перловица обыкновенная (*Unio pictorum* L.). Двустворчатые моллюски обычно обладают более высокой способностью накапливать эти металлы из водной среды по сравнению со многими другими крупными водными организмами [1; 2; 3]. Благодаря своим способностям к высокой биоаккумуляции металлов и малоподвижному образу жизни двустворчатые моллюски часто используются в программах биомониторинга для оценки состояния водных экосистем, особенно в районах, подверженных загрязнению металлами [4]. Выбранные водоемы характеризуются близкими физико-географическими условиями (географическое положение, климат, почвы, геологическое строение, растительность), но с существенным различием в степени и специфике хозяйственного освоения и техногенной нагрузки (рис. 1). Изучаемые водоемы отличаются гидрологическим режимом. Все без исключения водоемы городские и пригородной зоны используются для рыбной ловли, массового отдыха, проведения культурно-спортивных мероприятий и отчасти полива огородов. Водоемы Дедно, Шапор, Любенское, Малое, У-образное, Волотовское располагаются на территории города. В пригородной зоне отдыха находятся озера Володькино и Гребной канал. Озера Любенское, Дедно, Шапор и старица вблизи д. Поляновка – это пойменные водоемы, не утратившие связь с коренным руслом р. Сож. Гребной канал связан с р. Сож водоемом, искусственно созданным для отвода излишка воды в половодье от д. Якубовка.

Оз. Володькино – русловой водоем, возникший в результате расширения коренного русла р. Сож в месте впадения в него р. Ипуть. Озера Малое и Круглое – водоемы, образовавшиеся на месте карьеров по добыче глины, а озера Волотовское и У-образное некоторое время имели связь с р. Сож и остались после осушительной мелиорации в виде отдельных водоемов.



1) оз. Малое, 2) оз. Круглое, 3) оз. У-образное, 4) оз. Волотовское, 5) оз. Шапор,
6) оз. Дедно, 7) оз. Любенское, 8) Гребной канал, 9) оз. Володькино, 10) р. Сож

Рис. 1. Схема расположения водоемов г. Гомеля и отбора проб (а); точки отбора проб представляют собой участки р. Сож в районе д. Кленки и ниже административной черты города по течению в районе Гомельского объездного моста (б)

Fig. 1. The layout of the reservoirs of Gomel and sampling (a); sampling points are sections of r. Sozh in the area of the village of Klenka and below the administrative line of the city downstream in the area of the Gomel bypass bridge (b)

Для оценки влияния Гомельской городской агломерации на качество воды р. Сож и способности реки к самоочищению выполнялся отбор проб из нее выше города в районе д. Кленки, в городской черте в районе парковой набережной и ниже административной черты города по течению в районе Гомельского

объездного моста. Старица у д. Поляновка расположена на 10 км выше по течению от точки отбора проб на р. Сож у д. Кленки.

В исследовании представлены данные по содержанию изучаемых металлов в 2019–2021 гг. Такой временной промежуток был выбран не случайно, так как на протяжении 2019–2021 гг. количество осадков в летний период было ниже нормы, температура – выше климатической нормы и уровень воды в водоемах г. Гомеля, где проводились исследования, снизился более чем на 1 метр. Существенно изменились физико-химические условия в водных экосистемах: температура воды в придонных слоях увеличилась, выросло содержание растворенного кислорода, изменились окислительно-восстановительные условия в придонных слоях воды и т. д. В таких случаях соединения металлов в донных отложениях из малодоступных для биоты форм переходят в более доступные [5], активно поглощаются живыми организмами. Для донных отложений идет процесс очищения, металлы переходят в водную среду, а организмы животных и растений уносятся течением, если таковое имеется в водоеме. В биоте водных экосистем концентрация загрязнителей в таких случаях повышается [6].

Проведен сравнительный анализ содержания свинца и меди в водоемах в 2010 и 2019 гг. для определения изменения антропогенной нагрузки на водоем за 10 лет.

Для отлова моллюсков использовали дночерпатель и применяли ручной сбор. Мягкие ткани отделяли от раковин, сушили, а затем озоляли до белой золы в муфельной печи при 450 °С. Донные отложения отбирались по стандартной методике [7]. Отобранные образцы высушивались до воздушно-сухого состояния. Ситовым методом выделялась фракция менее 1 мм, затем пробы озолялись при 450 °С. Содержание тяжелых металлов в золе тканей моллюсков и донных отложений определяли методом ISP-масс-спектрометрии, на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой *Elan DRCe (Perkin Elmer)*, на базе лаборатории радиоэкологии Института радиобиологии НАН Беларуси. Полученные данные обрабатывали статистически в программе *Microsoft Excel*, проводился парный двухвыборочный t-тест для средних, а также корреляционный анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

Данные по изучению содержания свинца и меди в донных отложениях изученных водоемов приведены на рис. 3.

Содержание соединений свинца в донных отложениях практически всех изучаемых водных экосистем в 2019 г. снизилось по сравнению с 2010 г. в 1,1–22,7 раза (см. рис. 2). Исключение – оз. Володькино, что объяснить сложно, так как водоем находится выше черты г. Гомеля. Вероятно, в водоем поступает поверхностный сток с близлежащих территорий, где в почвах накопилось большое количество соединений различных металлов (ранее возле водоемов располагались луга заготовления сухих кормов для крупного рогатого скота, вносились удобрения, использовалась сельхозтехника для уборки сена). Объяснить повышение содержания свинца (рис. 2) и меди (рис. 3) в отложениях оз. Володькино можно также поступлением в водоем воды из р. Ипуть.

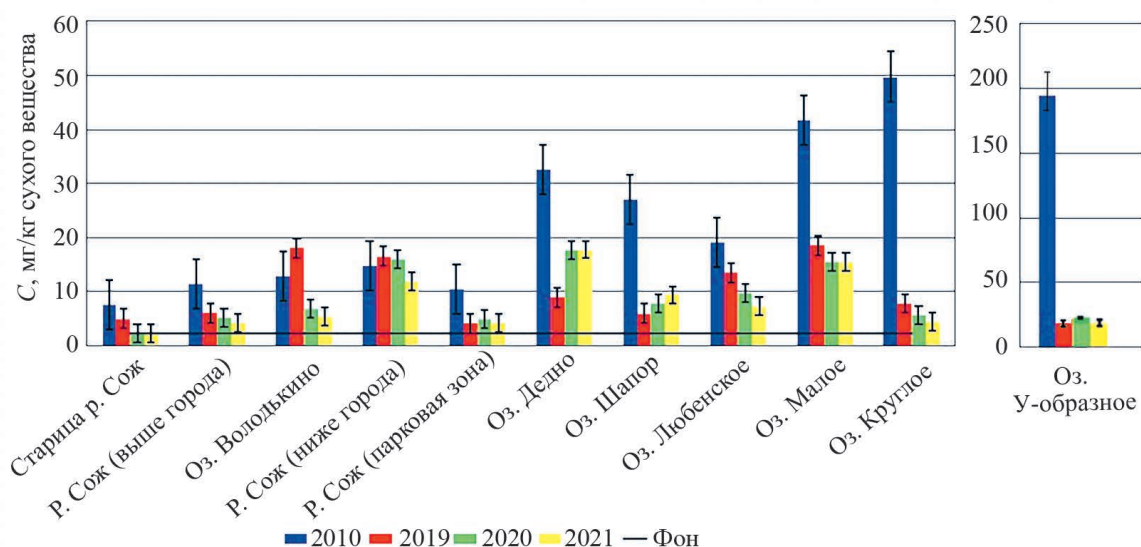


Рис. 2. Содержание свинца в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий

Fig. 2. Lead content in bottom sediments of water bodies of Gomel and adjacent territories

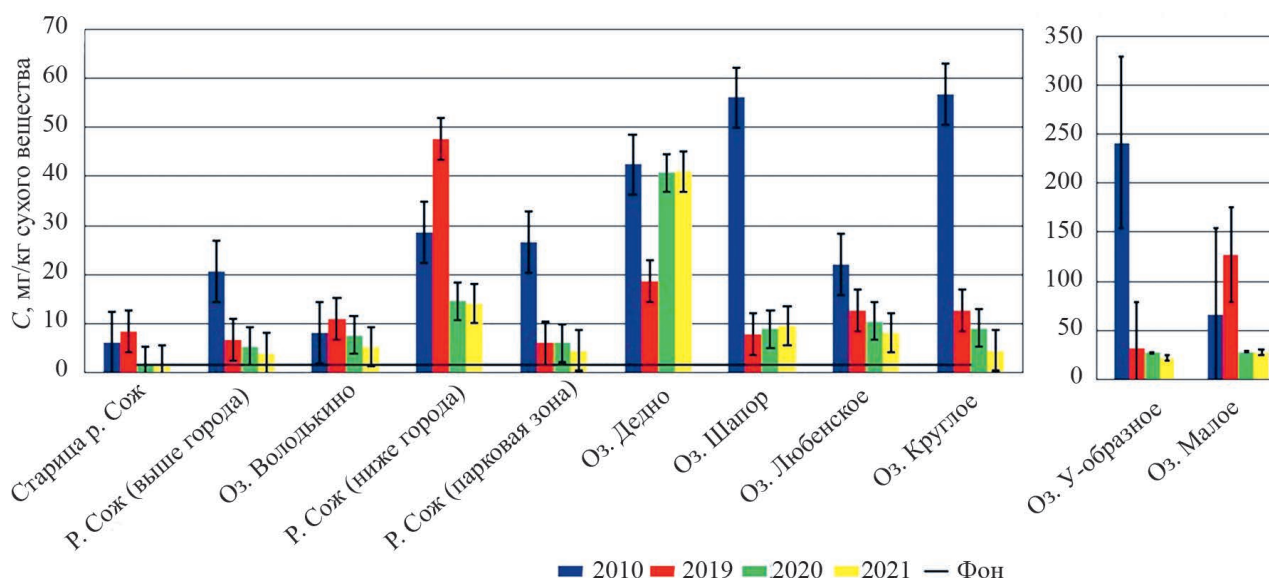


Рис. 3. Содержание меди в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий

Fig. 3. Copper content in bottom sediments of water bodies of Gomel and adjacent territories

Максимальное снижение содержания металла в донных отложениях наблюдалось в оз. У-образное, куда в течение длительного времени поступали сточные воды предприятий Северного промузла, что указывает на очищение водоема после прекращения сброса их стоков. Отмечено значительное уменьшение концентрации соединений свинца в донных отложениях водоемов, принимающих либо стоки предприятий (оз. Дедно), либо стоки с территории городских предприятий ОАО «Гомельдрев» завода «Гомельобой», ФСК (оз. Шапор). Государственная политика в области охраны окружающей среды Республики Беларусь требует принятия эффективных мер по недопущению загрязнения воздуха, водных и земельных ресурсов, сохранению биологического разнообразия. Начиная с 2007 г. ежегодно проводятся мероприятия по снижению отрицательного воздействия на атмосферный воздух Беларуси. Как пример, в 2007 г. проведено более 400 мероприятий, что позволило сократить выбросы загрязняющих веществ на 17,2 тыс. т. Минприроды и его органами устанавливаются лимиты на выбросы (сбросы) загрязняющих веществ и размещение отходов. Должностные лица Минприроды и его органов в соответствии с законодательством Республики Беларусь имеют право приостанавливать деятельность предприятий и производств, если они не соответствуют нормам экологической безопасности.

Причиной уменьшения содержания металла в донных отложениях исследуемых водоемов в 2019 г. в сравнении с 2010 г. является снижение антропогенной нагрузки на водные экосистемы изучаемых территорий, что может быть итогом проведения природоохранной политики в Республике Беларусь, а также следствием протекания процессов самоочищения водных экосистем. Снижение концентрации свинца в донных отложениях р. Сож в районе парковой зоны (центр города, где в реку выходит сток ливневой канализации с центральной части г. Гомеля) не столь значительно в сравнении с другими водоемами изучаемой территории. Это может являться причиной поступления соединений металла с поверхностным стоком города.

На протяжении 2019–2021 гг. содержание свинца в отложениях р. Сож парковой зоны изменялось не столь значительно, как в других изучаемых водоемах. Возможно, в почвах, прилегающих к берегу реки, сохранилось значительное количество соединений свинца, которые в период половодья и дождей поступают в р. Сож. Для донных отложений остальных изучаемых водоемов за 2019–2021 гг. также было отмечено снижение концентрации данного металла. Исключение составляют озера У-образное, Дедно и Шапор, принимающие загрязненный поверхностный сток с территории г. Гомеля.

На рис. 4 представлены данные, отражающие характер накопления меди донными отложениями водоемов в 2010–2019 гг. В донных отложениях большинства изучаемых водных экосистем содержание меди в 2019 г. было ниже, чем в 2010 г., в 1,2–7,6 раза, что свидетельствует о протекании процесса самоочищения водоема, когда растения, которые являются биофильтрами, поглощают медь из донных отложений, часть загрязнителей уходит из донных отложений в воду и уносится течением. В отложениях Старицы и оз. Володькино содержание металла незначительно увеличилось. Большое снижение содержания меди отмечено для отложений водоемов, испытывающих высокую антропогенную нагрузку (озера Дедно, Ша-

пор, У-образное). Однако в донных отложениях оз. Малое и на участке р. Сож ниже черты г. Гомеля концентрация меди увеличилась. Вдоль берега оз. Малое проходит железнодорожная дорога, соединяющая речной порт, элеватор и предприятия Северного промузла, которая используется для перевозки грузов и по настоящий момент. Водоем принимает стоки городских коллекторов и частных предприятий, расположенных вблизи озера. Также в оз. Малое поступают стоки с автостоянки супермаркета и территории троллейбусного парка. Все вышеперечисленные факторы могут способствовать высокому содержанию изучаемых тяжелых металлов, в том числе и меди в компонентах водоема. В отложениях оз. Малое содержится большое количество органических соединений, являющихся природными сорбентами, что увеличивает загрязненность водоема тяжелыми металлами. Повышение содержания соединений металла на участке р. Сож ниже черты города указывает на влияние городской агломерации г. Гомеля на состояние р. Сож.

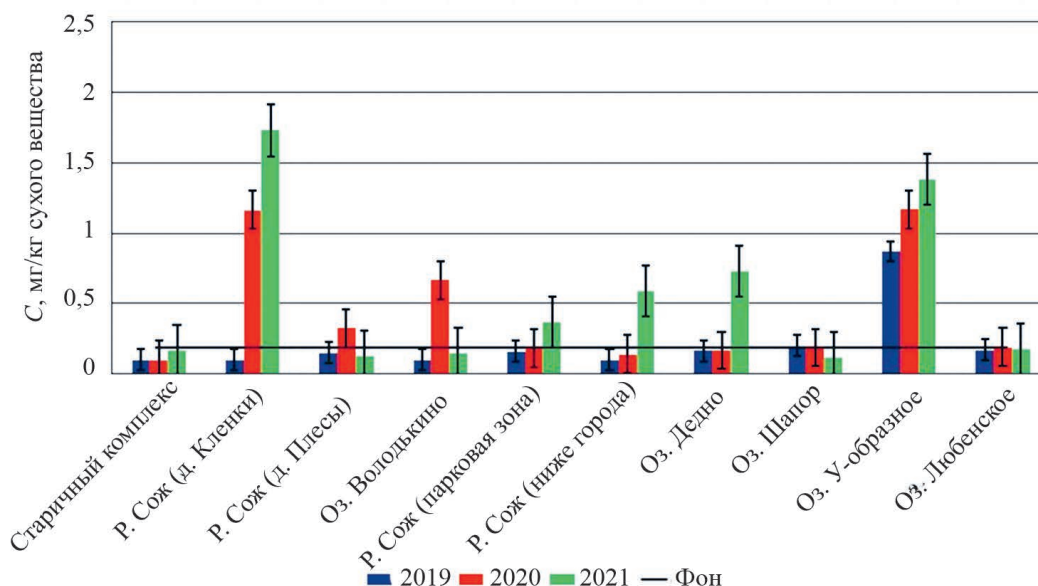


Рис. 4. Содержание свинца в мягких тканях перловницы в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий

Fig. 4. Lead content in the soft tissues of pearl barley in the reservoirs of Gomel and adjacent territories

Максимальное снижение содержания меди в донных отложениях составило 7,6 раза для отложений оз. У-образное, которое длительное время принимало сточные воды предприятий Северного промузла г. Гомеля. В водоеме произрастает большое количество водных растений, что могло повлиять на содержание тяжелых металлов в донных отложениях водоема [8; 9]. В оз. Круглое содержание меди в отложениях снизилось в среднем в 4,5 раза, что связано с большим количеством водных растений, являющихся биофильтрами [8; 9], которые при реконструкции моста, расположенного очень близко к водоему, удалялись в течение нескольких лет.

В период с 2019 по 2021 гг. наблюдалось снижение содержания меди в донных отложениях большинства изучаемых водоемов в 1,1–5,2 раза, исключение составляют водоемы, испытывающие значительную антропогенную нагрузку (участок р. Сож в парковой зоне принимает ливневые воды центра г. Гомеля; оз. Дедно имеет контакт через земляную дамбу с водоемом, принимающим сточные воды предприятий г. Гомеля и стоки двух коллекторов – Прудковского и Хатаевичского; оз. Шапор, куда поступают поверхностные стоки с территорий предприятий АПДО «Гомельдрев» и завода «Гомельобой», а также ФСК).

На участке р. Сож ниже черты города содержание металла в отложениях в 2020 г. незначительно снизилось по сравнению с данными 2019 г. и оставалось на таком же уровне и в 2021 г., что свидетельствует о присутствии металла в поверхностных стоках г. Гомеля, поступающих в р. Сож.

Содержание соединений меди в отложениях изучаемых водоемов в период 2019–2021 гг. значительно выше, а свинца ниже, чем в донных отложениях р. Сунгари вблизи г. Харбина (для меди $3,95 \pm 0,13$ мг/кг сухого вещества, для свинца $21,93 \pm 2,65$ мг/кг сухого вещества) [10].

В организм гидробионтов тяжелые металлы попадают с пищей или через покровы [11; 12]. Действие тяжелых металлов проявляется на всех уровнях организации биологических систем – от молекулярно-биохимического до биоценотического. Токсическое действие металлов многозначно. Они являются протоплазматическими ядами для всех живых объектов: грубо нарушают структуры коллоидных систем, денатурируют белки. При очень большом разведении тяжелые металлы связывают и блокируют активные

центры ферментов. Именно эти нарушения нормальной и согласованной работы ферментных систем представляют основной механизм действия токсических веществ. Наиболее исследовано токсическое действие тяжелых металлов на позвоночных [13].

На рис. 4 представлена динамика содержания свинца в мягких тканях перловицы. В 2019 г. содержание свинца в тканях моллюсков данного вида снизилось в 5,0 раз при сравнении с величинами, полученными в 2010 г., но в дальнейшем в 2020 и 2021 гг. содержание свинца однонаправленно увеличилось, а в 2021 г. составило половину того содержания, которое было характерно для 2010 г. Как отмечалось выше, это может быть следствием проведения природоохранной политики в Республике Беларусь, а также протекания процессов самоочищения водных экосистем. Повышение содержания свинца в тканях перловицы в 2019–2021 гг. свидетельствует об увеличении биологической доступности форм металлов в донных отложениях, так как его поступление в окружающую среду значительно снизилось. Длительный промежуток времени в Республике Беларусь не использовался этилированный бензин, производственные выбросы в атмосферу сократились, а также в г. Гомеле отсутствуют предприятия, выбрасывающие соединения свинца в значительных количествах. Известно, что водные животные могут накапливать тяжелые металлы в своих мягких тканях в концентрациях, которые могут в десятки и тысячи превышать их содержание в среде обитания [10].

Низкое содержание свинца отмечено у особей перловиц, обитающих в старичном комплексе, что подтверждает отсутствие антропогенного поступления соединений металла в данную водную экосистему. У моллюсков данного вида, обитающих в старичном комплексе, в 2021 г. концентрация соединения свинца увеличивалась по отношению к 2019 и 2020 г. в 1,6 раза, что является следствием вторичного загрязнения водоема, когда металлы переходят в абиотических компонентах в доступные для биологических объектов формы. Донные отложения старичного комплекса содержат соединения свинца в доступной форме, которые могут оказать негативное влияние на биологические компоненты данной водной экосистемы. Содержание свинца в моллюсках старичного комплекса может быть использовано для сравнительного анализа загрязнения водных экосистем города. На протяжении всего периода исследований практически не изменялось содержание соединений свинца у перловиц, обитающих в оз. Любенское, несмотря на то что вдоль его берега проходит крупная объездная автомагистраль, остановка общественного транспорта, а также водоем принимает поверхностный сток с улиц и огородов частного сектора города, все же в донных отложениях содержание свинца однонаправленно снижалось. Возможно, это следствие контроля со стороны организма за поступлением токсикантов в органы и ткани.

Однонаправленное увеличение соединений свинца у особей на всех участках р. Сож и в озерах У-образное и Дедно может свидетельствовать о высокой доступности соединений металла в отложениях, а для участка р. Сож парковой зоны и озер У-образное и Дедно, где содержание свинца увеличивалось в донных отложениях, еще и о поступлении загрязнителей с поверхностным стоком. Можно предположить, что механизм контроля за поступлением токсикантов в организм, так называемый «механизм блокировки», дал сбой, и в ткани моллюсков стали поступать все доступные формы металла, находящиеся в воде и отложениях вышеперечисленных водоемов. Многие исследователи указывают на тот факт, что двустворчатые моллюски могут регулировать концентрацию металлов в своих тканях. Например, у морского черенка *Sinonovacula constricta* есть механизм регулирования накопления таких металлов, как медь при длительном воздействии [14]. Эта регуляторная способность у двустворчатых моллюсков ограничена, когда концентрация металлов в абиотических компонентах превышает определенный порог [15; 16]. Механизмы выведения тяжелых металлов из организма имеют различный характер. Известно, что цитоплазматические белки имеют свойство связывать избытки металлов в организме у мидий Грея *Crenomytilus grayanus*, а у принадлежащего этому же семейству модиолуса *Modiolus kurilensis* связывание происходит на уровне мембранных структур [17].

Отмечено высокое содержание соединений свинца в тканях перловиц, обитающих на участке р. Сож выше черты г. Гомеля (д. Кленки). Участок р. Сож в районе д. Кленки активно использовался населением для отдыха и рыбалки круглый год, поэтому можно наблюдать большое количество автотранспорта на берегу реки. Однако маловероятно, что данные факты повлияли на высокое содержание металла в тканях моллюсков. Вышеназванный участок реки загрязняется поверхностным стоком с огородов частного сектора. Содержание соединений свинца в удобрениях, которые вымываются с поверхностным стоком с сельскохозяйственных территорий, вряд ли может оказать значительное влияние на накопление доступных форм элемента в донных отложениях. Факт высокого накопления соединений свинца в мягких тканях перловицы на данном участке реки требует дальнейшего детального изучения.

На фоне увеличения содержания соединений свинца в мягких тканях перловицы большинства изучаемых водоемов в 2021 г. у представителей, обитающих на участке р. Сож в окрестностях д. Плесь, в оз. Володькино и в оз. Шапор, содержание металла снизилось, что можно объяснить включением механизма контроля за поступлением соединений металла в организм моллюсков, когда скорость выведения

токсикантов превышает скорость поступления в организм. Факт контроля со стороны живых организмов за поступлением токсикантов в ткани и органы необходимо учитывать при проведении изучения загрязнения экосистем.

На рис. 5 показано содержание меди в мягких тканях перловицы изучаемых водоемов. Разница в содержании металла в тканях моллюсков в 2010 и 2019 гг. составила 12 раз в сторону снижения. В 2020 г. концентрация металла снижалась, однако в 2021 г. отмечено увеличение содержания данного загрязнителя в мягких тканях перловицы в 1,5 раза. Снижение концентрации соединений меди в биологических объектах водных экосистем свидетельствуют о протекании процесса самоочищения водоема, поскольку этот металл широко используется как в производственных процессах, так и быту.

Отмечена единая динамика изменения содержания соединений меди в мягких тканях моллюсков во всех водоемах в период с 2019 по 2021 г., кроме старичного комплекса: снижение содержания в 2020 г. в 1,5–2,0 раза в сравнении с 2019 г. и дальнейшее увеличение в 2021 г. Максимальное снижение содержания меди в 2020 г. по сравнению с 2019 г. наблюдалось у моллюсков на участке р. Сож в районе д. Плесы и составило 1,9 раза. Минимум снижения составил 1,1 раза для особей, обитающих в оз. Шапор.

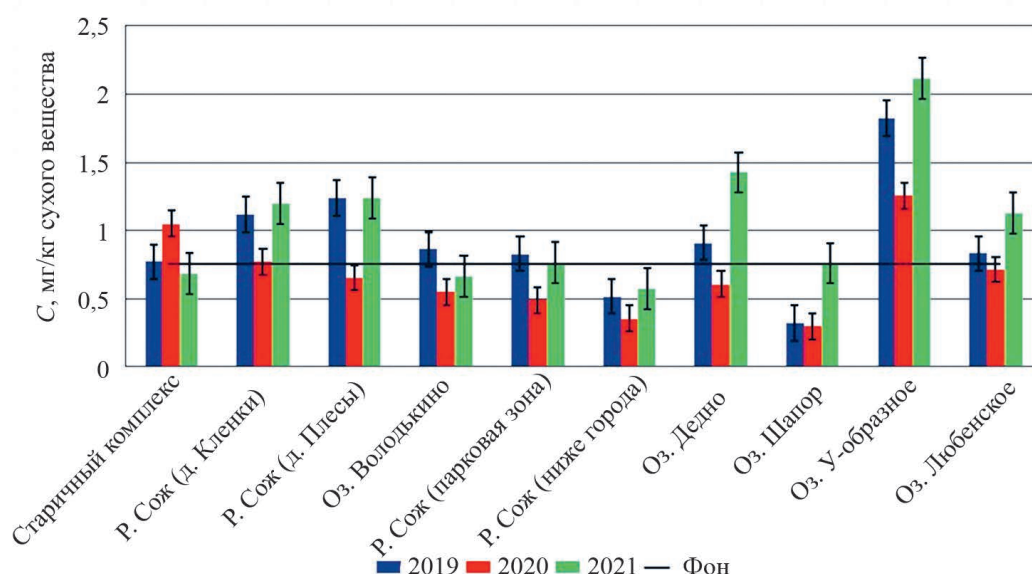


Рис. 5. Содержание меди в тканях перловицы в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий

Fig. 5. Copper content in pearl barley tissues in water bodies of Gomel and adjacent territories

Значительное повышение содержания меди в 2021 г. по сравнению с 2020 г. отмечено у моллюсков в водоемах, подвергающихся высокой антропогенной нагрузке (озера Дедно и У-образное). Снижение концентрации меди с 2019 по 2020 гг. свидетельствует о снижении поступления соединений металла в водные экосистемы, а увеличение в 2021 г. может говорить о протекании внутриводных процессов, связанных с изменением физико-химических показателей состояния водоемов, что и привело к доступности меди для моллюсков данного вида в загрязненных водоемах.

В период исследований низкое содержание меди в тканях перловицы отмечено в оз. Шапор и на участке р. Сож, ниже административной черты г. Гомеля, причем водоемы испытывали высокую антропогенную нагрузку. Можно предположить, что данный факт является следствием работы «механизма блокировки» поступления соединений меди в мягкие ткани моллюсков, особенно если учитывать, что в отложениях р. Сож ниже административной черты определено высокое содержание металла. В 2020 г. максимальная и высокая концентрация меди отмечена в тканях особей, обитающих в старичном комплексе р. Сож и в оз. У-образное. Установлено низкое содержание металла в тканях перловиц, обитающих на участке р. Сож ниже города по течению, и в оз. Володькино, где значительно меньше антропогенная нагрузка на водоем. Данный факт, предположительно, может быть связан с высокой сорбционной способностью донных отложений на участке р. Сож ниже черты города, где содержится большое количество органических веществ, которые прочно удерживают соединения меди в недоступных для биоты формах, что свидетельствует о высокой способности реки к процессам самоочищения.

Содержание свинца ($2,98 \pm 0,34$ мг/кг сухого вещества) и меди ($7,97 \pm 0,28$ мг/кг сухого вещества) у моллюсков рода *Unio* в р. Сунгари рядом с Харбином выше, чем у перловиц в изучаемых водоемах [10].

В ходе исследований определены коэффициенты накопления соединений тяжелых металлов в тканях перловицы для каждого изучаемого водоема (табл. 1).

Коэффициент накопления рассчитывается по следующей формуле:

$$K_n = \frac{C_x}{C_y},$$

где C_x – концентрация металла в моллюсках; C_y – концентрация металла в донных отложениях водоема.

Таблица 1

Коэффициенты накопления тяжелых металлов в тканях перловицы обыкновенной в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий

Table 1

Coefficients of accumulation of heavy metals in the tissues of common pearl barley in the reservoirs of Gomel and adjacent territories

Водоем	Год					
	2019	2020	2021	2019	2020	2021
	Свинец			Медь		
Старичный комплекс	0,02	0,05	0,07	0,09	0,64	0,40
Р. Сож выше города	0,02	0,23	0,41	0,16	0,14	0,29
Оз. Володькино	0,01	0,10	0,03	0,08	0,07	0,12
Р. Сож в р-не парковой зоны	0,04	0,04	0,09	0,14	0,12	0,16
Р. Сож ниже черты города	0,01	0,02	0,05	0,01	0,02	0,04
Оз. Дедно	0,02	0,01	0,04	0,05	0,02	0,04
Оз. Шапор	0,03	0,02	0,01	0,04	0,03	0,08
Оз. У-образное	0,05	0,05	0,07	0,06	0,05	0,09
Оз. Любенское	0,01	0,02	0,03	0,07	0,07	0,14

Единой динамики в накоплении соединений свинца в мягких тканях перловицы не установлено, что может быть следствием различных путей поступления металла в водоемы. Увеличение накопления изучаемого металла характерно для моллюсков, обитающих на участках р. Сож как выше, так и ниже административной черты города по течению, в старичном комплексе и в оз. Любенское. Объяснить высокий уровень накопления металлов на участке р. Сож до принятия стоков города в окрестностях д. Кленки довольно сложно. Все вышеперечисленные водоемы различаются антропогенной нагрузкой, что еще раз подчеркивает необходимость изучения загрязнения водных экосистем, не испытывающих видимой антропогенной нагрузки. Необходимо отметить факт значительного накопления загрязнителей в тканях живых организмов в чистых водных объектах по сравнению с загрязненными водоемами вследствие работы «механизма блокировки». Накопление соединений металлов в тканях моллюсков до высоких уровней в водоемах с низким содержанием металла в донных отложениях отмечено в литературе [14].

Старичный комплекс р. Сож не испытывает видимой антропогенной нагрузки, но однонаправленное, хоть и незначительное, увеличение накопления соединений свинца в тканях моллюсков, как и в оз. Любенское, можно объяснить переходом металла в донных отложениях в биологически доступные формы. В донных отложениях старичного комплекса увеличилось количество органического вещества, которое ранее вымывалось в период половодья в р. Сож. Органическое вещество является важной депонирующей фракцией различных загрязнителей, в том числе и тяжелых металлов. В 2020 и 2021 гг. величины коэффициентов накопления свинца у особей, обитающих в старичном комплексе, превысили показатели, рассчитанные для некоторых городских водоемов.

Увеличение накопления соединений свинца в 2021 г. в мягких тканях моллюсков, обитающих на участке р. Сож ниже административной черты города, где собирается практически весь поверхностный сток с территорий г. Гомеля, свидетельствует о влиянии стока города на экосистему р. Сож, в частности на содержания соединений свинца.

Предполагалось, что высокое накопление соединений свинца в мягких тканях моллюсков будет отмечено в оз. У-образное, куда поступает поверхностный сток с автомагистрали, автостоянки и территории Прудковского рынка, а также на участке р. Сож парковой зоны. Но в водоемах в 2019 и 2020 гг. уровень

накопления металла в тканях перловицы был практически на одном и том же уровне, а в 2021 г. увеличился в 1,4 раза в оз. У-образное и в 2,3 раза у особей р. Сож, что говорит не только о поступлении соединений свинца в водоем с поверхностным стоком и об увеличении доступных форм металла в компонентах водоема, но и скорее всего о срыве работы «механизма блокировки» и бесконтрольном поступлении загрязнителей в организм перловицы.

У моллюсков, обитающих в оз. Володькино, увеличение значения коэффициента накопления свинца в 2020 г. по сравнению с 2019 г. составило 10 раз, что активизировало контроль со стороны организма за поступлением токсикантов в ткани, и в результате уровень накопления металла снизился к 2021 г. в 3,3 раза. Для особей оз. Дедно характерна обратная динамика: снижение коэффициента накопления свинца к 2020 г., затем повышение в 2021 г., что при увеличении содержания металла в донных отложениях может быть следствием работы «механизма блокировки». Только у моллюсков в оз. Шапор отмечено снижение накопления соединений свинца при увеличении концентрации в донных отложениях. Это подтверждает факт наличия контроля со стороны организма за поступлением поллютантов в организм.

Для особей большинства изучаемых водных экосистем значения коэффициентов накопления соединений меди в 2019 и 2020 гг. различались незначительно, хотя в 2020 г. рассчитаны более низкие величины в сравнении с 2019 г. при общей тенденции снижения содержания металла в донных отложениях водоемов. Это может свидетельствовать об отсутствии соединений меди в поверхностном стоке с прилегающих к водоему территорий. Причиной увеличения значения коэффициента накопления в большинстве водоемов в 2021 г. является в большей степени следствием вторичного загрязнения водных экосистем, когда металлы в компонентах водоемов переходят в более доступные для живых организмов формы. Значительное увеличение коэффициента накопления меди в 2021 г. отмечено у моллюсков старичного комплекса (в 7,1 раза) в сравнении с 2019 г. при снижении содержания металла в донных отложениях. Высокие значения коэффициентов накопления меди характерны для моллюсков р. Сож выше черты города и в районе центра города. Здесь река принимает поверхностный сток с центральной части города, где может содержаться значительное количество соединений меди, накопившихся за долгое время в почвах городских территорий, что может повлиять на накопление металла в мягких тканях моллюсков. На участке реки выше черты города соединения меди могут поступать с огородов дачных поселков, где бесконтрольно используют пестициды и удобрения, содержащие соединения меди. Данный факт может повлиять на накопление соединений меди в биотических компонентах водных экосистем, хотя участок реки не испытывает видимую антропогенную нагрузку. На участке ниже административной черты г. Гомеля накопление меди в тканях моллюсков ниже, чем у особей реки в центре города, что свидетельствует о содержании металлов в отложениях реки в малодоступных для двустворчатых моллюсков формах, нивелируя в определенной степени негативное влияние поверхностного стока города на экосистему р. Сож. Однако на участке ниже черты города у моллюсков значение коэффициента накопления меди увеличивалось на протяжении всего периода исследования, которое не отмечалось у перловиц ни в одном другом водоеме, что может стать опасным для состояния биологических объектов на данном участке реки, который активно используется для любительского рыболовства.

Значительное увеличение в 2021 г. величины коэффициента накопления в сравнении с 2020 г. было определено у особей озер Любенское и Володькино, имеющих различный характер антропогенной нагрузки. Особенно стоит обратить внимание на накопление соединений меди до высоких уровней у моллюсков в оз. Володькино, так как водоем очень активно используется для ловли рыбы и продажи населению в близлежащих крупных дачных поселках.

Рассчитанные значения коэффициентов накопления меди в мягких тканях перловицы были выше в сравнении с величиной коэффициента накопления свинца. Похожие закономерности получены при изучении загрязнения тяжелыми металлами мягких тканей устриц. По результатам исследования Сао Х, et al. [4], константа скорости элиминации меди и цинка, рассчитываемая по формуле $C_t = C_0 e^{-kt}$, показывает снижение концентрации тяжелых металлов в тканях моллюсков после перевода их в чистую среду, которое у некоторых видов устриц близко к нулю, следовательно, двустворчатые моллюски практически не способны «отдавать» соединения меди и цинка из организма.

При изучении возможности использования моллюсков как биоиндикаторов загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами важную роль играет корреляционная зависимость между содержанием загрязнителей в мягких тканях моллюсков и абиотических компонентов. Изучение содержания тяжелых металлов в воде идет после ее фильтрования, значит удаления основной органической фракции, которую поглощают моллюски, поэтому было принято решение провести корреляционный анализ содержания тяжелых металлов между мягкими тканями перловицы и донными отложениями. Как известно, двустворчатые моллюски в ходе питания фильтруют придонные слои воды, где в большей степени находится органическое вещество. Расчеты были проведены для каждого года исследований отдельно, поскольку в донных отложениях формы нахождения металлов могут изменяться с течением времени (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициент корреляции между содержанием металлов в мягких тканях перловицы обыкновенной и донными отложениями водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий

Table 2

Correlation coefficient between metal content in soft tissues of common barley and bottom sediments of reservoirs in Gomel and adjacent areas

Год	r	Pb	Cu
2019	1	0,50	0,15
	2	0,85	0,79
2020	1	0,39	0,14
	2	0,84	0,62
2021	1	0,43	0,36
	2	0,88	0,85

Примечание. 1 – истинное значение r; 2 – значение r после удаления артефактов.

При изучении корреляционных связей в 2019 г. между содержанием металлов в мягких тканях перловицы и донными отложениями была установлена высокая степень связи для соединений свинца. На примере растений С. Е. Головатый установил, что при высоком содержании тяжелых металлов в почвах накопление металлов в растительных организмах не имело прямолинейной зависимости от содержания [18]. При низких концентрациях металлов в почве поглощались все доступные формы металлов, однако при повышении концентрации накопление снижалось. Данный факт может свидетельствовать о прекращении поступления тяжелых металлов в живые организмы, или скорость введения металла в организм была равно скорости поглощения, либо превышало ее. В литературе указывается, что в таких случаях расчет корреляционных зависимостей можно проводить без учета аномально высоких или низких значений, которые выходили за пределы $\pm 2\sigma$ от рассчитанной линии регрессии. Так, при изучении корреляционной зависимости соединений свинца в мягких тканях моллюсков и донных отложениях авторами были исключены концентрации металла, полученные для оз. Володькино и участков р. Сож в районе парковой зоны и ниже административной черты города. В таком случае коэффициент корреляции изменил свое значение с ($r = 0,50$) до ($r = 0,85$), что свидетельствует о тесной связи между содержанием свинца в тканях моллюсков и донных отложениях. Такой метод расчета был применен для меди и свинца на протяжении всего периода исследований, и в результате значение коэффициента корреляции значительно повысилось. Было установлено, что для свинца и меди характерна высокая степень связи между концентрацией в донных отложениях и тканях моллюсков.

При анализе полученных данных можно предположить, что соединения свинца и меди поступают в мягкие ткани моллюсков преимущественно из донных отложений.

Заключение

При сравнительном анализе содержания свинца и меди в донных отложениях и мягких тканях перловицы в 2010 и 2019 гг. отмечена тенденция к снижению концентрации изучаемых металлов за исключением отдельных водных экосистем. Снижение содержания в компонентах биосистем соединений меди и свинца к 2019 г. свидетельствует об эффективности природоохранной политики, проводимой в Республике Беларусь, так как донные отложения как депонирующая фракция, предоставляют информацию о загрязнении водных экосистем за длительный промежуток времени. Отмечено, что почвы водосборных территорий, прилегающие к водным экосистемам, накопили за длительное время значительные количества тяжелых металлов, и могут служить источником загрязнения водных экосистем. Данный факт подтверждается повышением содержания изучаемых металлов в 2021 г. в сравнении с 2019 и 2020 гг. в донных отложениях и в мягких тканях моллюсков отдельных водоемов. Учитывая вышесказанное, ожидать быстрого очищения компонентов водных экосистем в скором времени не приходится.

Снижение концентрации свинца и меди в донных отложениях водоемов при одновременном повышении таковых в мягких тканях моллюсков в период 2019–2021 гг. свидетельствует о вторичном загрязнении водных экосистем, когда соединения тяжелых металлов переходят в донных отложениях в биологически доступные формы и активно поглощаются живыми организмами. На увеличение доступности

для моллюсков соединений меди и свинца в донных отложениях указывает увеличение коэффициентов накопления металлов за период исследования в большей части водных экосистем.

Выявлена тесная корреляционная зависимость между концентрациями свинца и меди в донных отложениях и мягких тканях моллюсков, что подтверждает поступление соединений металлов в ткани перловицы из донных отложений при фильтрации придонных слоев воды.

Перловица обыкновенная (*Unio pictorum* L.) может быть использована для оценки содержания доступных форм свинца и меди в донных отложениях водных экосистем.

Библиографические ссылки

1. Fukunaga A, Anderson MJ. Bioaccumulation of Copper, Lead and Zinc by the Bivalves *Macomona liliana* and *Austrovenus stutchburyi*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2011;396:244–252.
2. Liu F, Wang WX. Differential Influences of Cu and Zn Chronic Exposure on Cd and Hg Bioaccumulation in an Estuarine Oyster. *Aquatic Toxicology*. 2014;148:204–210.
3. Tan QG, Wang Y, Wang WX. Speciation of Cu and Zn in Two Colored Oyster Species Determined by X-Ray Absorption Spectroscopy. *Environmental Science & Technology*. 2015;49:6919–6925.
4. Cao X, et al. Interspecies Calibration for Biomonitoring Metal Contamination in Coastal Waters Using Oysters and Mussels. *Science of the Total Environment*. 2023;883:163703.
5. Li Z, et al. Adsorption and Desorption of Heavy Metals at Water Sediment Interface Based on Bayesian Model. *Journal of Environmental Management*. 2023;329:96055–96074.
6. Vural P, Acarli S. Monthly variation of micro-and macro-element composition in smooth scallop, *Flexopecten glaber* (Linnaeus, 1758), from the Çardak Lagoon (Çanakkale Strait, Turkey). *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2021;38:449–459.
7. Абакумов ВА. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Ленинград: Гидрометеиздат; 1983. 240 с.
8. Комаровский ФЯ, Полищук ЛР. Ртуть и другие тяжелые металлы в водной среде: миграция, накопление, токсичность для гидробионтов. *Гидробиологический журнал*. 1981;17(5):71–83.
9. Позднякова АИ. Тяжелые металлы в системе «донные отложения – водная растительность» речных экосистем в зоне наблюдения Белорусской атомной станции. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;3:41–52.
10. Зарыхта ВВ, и др. Дифференциальное накопление тяжелых металлов в мягких тканях трех видов двусторчатых моллюсков из реки Сунгари вблизи г. Харбина (Китай). *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*. 2020;56(2):119–126.
11. Wu X, Jia Y, Zhu H, Wang H. Bioaccumulation of Cadmium Bound to Humic Acid by the Bivalve *Meretrix Linnaeus* from Solute and Particulate Pathways. *Journal of Environmental and Sciences*. 2010;22:198–203.
12. Ke Y, et al. Heavy Metal Accumulation in Oysters from an Aquaculture Area in the Luoyangjiang River Estuary. *Toxics*. 2024;12(9):645.
13. Безматерных ДМ. Моллюски прудовик обыкновенный и прудовик яйцевидный как аккумулятивные индикаторы загрязнения пресных вод тяжелыми металлами. *Проблемы биогеохимии и геохимической экологии*. 2018;1(5):112–117.
14. Ke Y, Wang WX. Dynamics of Copper Regulation in a Marine Clam *Sinonovacula constricta* at the Organ Level: Insight from a physiologically Based Pharmacokinetic Model. *Environmental Pollution*. 2023;336:122421.
15. Shi D, Wang WX. Understanding the Differences in Cd and Zn Bioaccumulation and Subcellular Storage among Different Populations of Marine Clams. *Environmental Science & Technology*. 2004;38:449–456.
16. Chan H. Accumulation and Tolerance to Cadmium, Copper, Lead and Zinc by the Green Mussel *Perna viridis*. *Marine Ecology Progress Series*. 1988;48:295–303.
17. Подгурская ОВ, Кавун ВЯ, Лукьянова ОН. Аккумуляция и распределение тяжелых металлов в органах мидии *Crenomytilus grajanus* и *Modiolus modiolus* из районов апвеллингов Охотского и Японского морей. *Биология моря*. 2004;30(3):219–226.
18. Головатый СЕ. Тяжелые металлы в агроэкосистемах. Минск: РУП «Институт почвоведения и агрохимии»; 2002. 239 с.

References

1. Fukunaga A, Anderson MJ. Bioaccumulation of Copper, Lead and Zinc by the Bivalves *Macomona liliana* and *Austrovenus stutchburyi*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2011;396:244–252. DOI:10.1016/j.jembe.2010.10.029.
2. Liu F, Wang WX. Differential Influences of Cu and Zn Chronic Exposure on Cd and Hg Bioaccumulation in an Estuarine Oyster. *Aquatic Toxicology*. 2014;148:204–210. DOI:10.1016/j.aquatox.2014.01.014.
3. Tan QG, Wang Y, Wang WX. Speciation of Cu and Zn in Two Colored Oyster Species Determined by X-Ray Absorption Spectroscopy. *Environmental Science & Technology*. 2015;49:6919–6925. DOI:10.1021/es506330h.
4. Cao X, et al. Interspecies Calibration for Biomonitoring Metal Contamination in Coastal Waters Using Oysters and Mussels. *Science of the Total Environment*. 2023;883:163703. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.163703.
5. Li Z, et al. Adsorption and Desorption of Heavy Metals at Water Sediment Interface Based on Bayesian Model. *Journal of Environmental Management*. 2023;329:96055–96074. DOI:10.1016/j.jenvman.2022.117035.
6. Vural P, Acarli S. Monthly variation of micro-and macro-element composition in smooth scallop, *Flexopecten glaber* (Linnaeus, 1758), from the Çardak Lagoon (Çanakkale Strait, Turkey). *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2021;38:449–459. DOI:10.12714/egejfas.38.4.06.
7. Abakumov VA. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverhnostnykh vod i donnykh otlozhenij* [Guide to Methods of Hydrobiological Analysis of Surface Waters and Bottom Sediments]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1983. 240 p. Russian.
8. Komarovskiy FY, Polischuk LR. *Rtut' i drugie tyazhelye metally v vodnoy srede: migratsiya, nakopleniye, toksichnost' dlya gidrobiontov* [Mercury and other heavy metals in the aquatic environment: migration, accumulation, toxicity to aquatic organisms]. *Hydrobiological Journal*. 1981;17(5):71–83. Russian.

9. Pozdnyakova AI. *Tyazhelye metally v sisteme «donnye otlozheniya – vodnaya rastitel'nost'» rechnyh ekosistem v zone nablyudeniya Belorusskoj atomnoj stancii* [Heavy metals in the system «bottom sediments – aquatic vegetation» of river ecosystems in the observation zone of the Belarusian nuclear power plant]. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;3:41–52. Russian. DOI:10.46646/2521-683X/2020-3-41-52
10. Zarykhta VV, et al. *Differencial'noe nakoplenie tyazhelykh metallov v myagkikh tkanyakh trekh vidov dvustvorchatykh mollyuskov iz reki Sungari vblizi g. Harbina (Kitaj)* [Differential accumulation of heavy metals in soft tissues of three species of bivalve mollusks from the Songhua River near Harbin (China)]. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2020;56(2):119–126. Russian. DOI: 10.31857/S0044452920020114.
11. Wu X, Jia Y, Zhu H, Wang H. Bioaccumulation of Cadmium Bound to Humic Acid by the Bivalve *Meretrix Linnaeus* from Solute and Particulate Pathways. *Journal of Environmental and Sciences*. 2010;22:198–203. DOI:10.1016/S1001-0742(09)60093-0.
12. Ke Y, et al. Heavy Metal Accumulation in Oysters from an Aquaculture Area in the Luoyangjiang River Estuary. *Toxics*. 2024;12(9):645. DOI: 10.3390/toxics12090645.
13. Bezmaternyh DM. *Mollyuski prудовик обыкновенный и прудовик яйцевидный как аккумулятивные индикаторы загрязнения пресных вод тяжелыми металлами* [The mollusks Pond Snail and Pond Snail as accumulative indicators of freshwater pollution by heavy metals]. *Problems of Biogeochemistry and Geochemical Ecology*. 2018;1(5):112–117. Russian.
14. Ke Y, Wang WX. Dynamics of Copper Regulation in a Marine Clam *Sinonovacula constricta* at the Organ Level: Insight from a Physiologically Based Pharmacokinetic Model. *Environmental Pollution*. 2023;336:122421. DOI:10.1016/j.envpol.2023.122421.
15. Shi D, Wang WX. Understanding the Differences in Cd and Zn Bioaccumulation and Subcellular Storage among Different Populations of Marine Clams. *Environmental Science & Technology*. 2004;38:449–456. DOI:10.1021/es034801o.
16. Chan H. Accumulation and Tolerance to Cadmium, Copper, Lead and Zinc by the Green Mussel *Perna viridis*. *Marine Ecology Progress Series*. 1988;48:295–303. DOI:10.3354/meps048295.
17. Podgurskaya OV, Kavun VYa, Lukyanova ON. *Akkumulyatsiya i raspredelenie tyazhelykh metallov v organakh midii Crenomytilus grajanus i Modiolus modiolus iz rajonov apvellingov Ohotskogo i Yaponskogo morej* [Accumulation and distribution of heavy metals in the organs of the mussels *Crenomytilus grajanus* and *Modiolus modiolus* from the upwelling areas of the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan]. *Marine Biology*. 2004;30(3):219–226. Russian.
18. Golovatyj SE. *Tyazhelye metally v agroekosistemah* [Heavy metals in agroecosystems]. Minsk: RUP «Institut pochvovedeniya i agrohimii»; 2002. 239 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 02.08.2025.
Received by editorial board 02.08.2025.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЯТИ ГЕНОМОВ *BUCHNERA APHIDICOLA* – ОБЛИГАТНОГО СИМБИОНТА ТЛЕЙ ФАУНЫ БЕЛАРУСИ

Я. П. КОНОНОВИЧ¹⁾, Р. С. ШУЛИНСКИЙ¹⁾, В. Ю. БОНДАРЕНКО¹⁾,
Д. Г. ЖОРОВ¹⁾, Н. В. ВОРОНОВА-БАРТЕ¹⁾

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

В исследовании представлены результаты сборки и аннотации геномов облигатных симбиотических бактерий *Buchnera aphidicola*, ассоциированных с пятью видами тлей (*Acyrtosiphon caraganae*, *Aphis craccivora*, *Brevicoryne brassicae*, *Macrosiphum albifrons* и *Myzus persicae*), распространенных на территории Беларуси. Они являются вредителями пищевых и технических сельскохозяйственных растений, а также растений, выполняющих орнаментальную функцию, что обуславливает актуальность изучения бактерий, обеспечивающих жизнеспособность насекомых. Цель исследования – получение полногеномных последовательностей бактерий и проведение их сравнительного анализа для выявления структурных особенностей, степени сохранности генома и функциональных отклонений, способных повлиять на симбиотические отношения между *B. aphidicola* и хозяином-тлей. В результате анализа выявлено, что исследованные штаммы *B. aphidicola* обладают типичным «полным» геномом, однако, несмотря на общую консервативность геномов, анализ ортологов выявляет наличие различий в составе и целостности ряда генов между штаммами. Кроме того, показано, что ген *trpE* триптофановой плазмиды *B. aphidicola* из *M. persicae* и *trpG* в плазмиде штамма из *A. craccivora* имеют нарушения в рамке считывания, что требует дальнейшего изучения, поскольку синтез триптофана является одной из важнейших функций *B. aphidicola* как симбионта тлей. При наличии такого нарушения можно предположить, что эту функцию берет на себя один из вторичных симбионтов, что возможно, учитывая взаимодополняющее действие вторичных и первичных симбионтов в видах тлей, *B. aphidicola* которых имеет «малый» геном. Таким образом, проведенное исследование расширяет существующие представления о геномной вариабельности и адаптациях *B. aphidicola* у различных видов тлей и подчеркивает важность комплексного подхода к изучению симбиотических систем, включающего не только аннотирование геномов, но и анализ потенциальных функциональных взаимодействий между микробными симбионтами. Это в перспективе позволит выявить механизмы устойчивости и адаптации фитофагов к различным экологическим условиям.

Ключевые слова: симбионт тли; *Buchnera aphidicola*; сборка генома; анализ ортологов; биоинформатика.

Образец цитирования:

Кононович ЯП, Шулинский РС, Бондаренко ВЮ, Жоров ДГ, Воронова-Барте НВ. Молекулярная характеристика пяти геномов *Buchnera aphidicola* – облигатного симбионта тлей фауны Беларуси. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2025;3:34–41.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-34-41>

For citation:

Kananovich YaP, Shulinski RS, Bandarenka UYu, Zhorov DG, Voronova-Barte NV. Molecular characteristics of five genomes of *Buchnera aphidicola* – an obligate symbiont of aphids in the fauna of Belarus. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2025;3:34–41. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-34-41>

Авторы:

Яна Павловна Кононович – ассистент младшего научного сотрудника биоинформатики и молекулярной эволюции животных, биологический факультет.

Роман Сергеевич Шулинский – аспирант кафедры общей экологии и методики преподавания биологии, биологический факультет.

Владислав Юрьевич Бондаренко – младший научный сотрудник НИЛ физиологии и биотехнологии растений; старший преподаватель кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений, биологический факультет.

Дмитрий Георгиевич Жоров – кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии, биологический факультет.

Нина Владимировна Воронова-Барте – кандидат биологических наук, доцент; научный руководитель СНИЛ биоинформатики и молекулярной эволюции животных, биологический факультет.

Authors:

Yana P. Kananovich, assistant of junior researcher at the laboratory of bioinformatics and molecular evolution of animals, faculty of biology.

yana.kananovich@gmail.com

Raman S. Shulinski, postgraduate student at the department of general ecology and methods of teaching biology, faculty of biology.

shulinsky@mail.ru

Uladsislav Yu. Bandarenka, junior researcher; senior lecturer at the department of cell biology and plant bioengineering, faculty of biology.

BandarenkaVY@bsu.by

Dmitrii G. Zhorov, PhD (biology); docent of the department of zoology, faculty of biology.

ZhorovDG@bsu.by

Nina Vladimirovna Voronova-Barte, PhD (biology), docent; head of the laboratory of bioinformatics and molecular evolution of animals, faculty of biology.

nvoronova@bsu.by

MOLECULAR CHARACTERISTICS OF FIVE GENOMES OF *BUCHNERA APHIDICOLA* – AN OBLIGATE SYMBIONT OF APHIDS IN THE FAUNA OF BELARUS

Ya. P. KANANOVICH^a, R. S. SHULINSKI^a, U. Yu. BANDARENKA^a, D. G. ZHOROV^a, N. V. VORONOVA-BARTE^a

^aBelarusian State University,
4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus
Corresponding author: Y. P. Kananovich (yana.kananovich@gmail.com)

This paper presents the results of genome assembly and annotation of the obligate symbiotic bacteria *Buchnera aphidicola* associated with five aphid species, namely *Acyrtosiphon caraganae*, *Aphis craccivora*, *Brevicoryne brassicae*, *Macrosiphum albifrons* and *Myzus persicae*, common in Belarus. These aphid species are pests of food and industrial agricultural plants, and plants that perform an ornamental function, which determines the relevance of studying the bacteria that ensure the viability of insects. The aim of the study was to obtain whole-genome sequences of bacteria and conduct comparative analysis to identify the structural features, degree of genome preservation, and functional deviations that can affect the symbiotic relationship between *B. aphidicola* and the aphid host. The analysis revealed that the studied *B. aphidicola* strains have a typical «complete» genome, however, despite the general conservation of genomes, the analysis of orthologs revealed differences in the composition and integrity of a number of genes between the strains. In addition, it was shown that the *trpE* gene of the *B. aphidicola* tryptophan plasmid from *M. persicae* and *trpG* in the plasmid of the strain from *A. craccivora* have disturbances in the reading frame, which requires further careful study, since tryptophan synthesis is one of the most important functions of *B. aphidicola* as an aphid symbiont. In the presence of such a violation, it can be assumed that this function is taken over by one of the secondary symbionts, which is possible given the complementary action of secondary and primary symbionts in the aphid species *B. aphidicola*, which has a «small» genome. Thus, the study expands the existing understanding of the genomic variability and adaptations of *B. aphidicola* in various aphid species and emphasizes the importance of an integrated approach to the study of symbiotic systems, including not only genome annotation but also the analysis of potential functional interactions between microbial symbionts, which in the future will allow us to identify the mechanisms of resistance and adaptation of phytophages to various environmental conditions.

Keywords: aphid symbiont; *Buchnera aphidicola*; genome assembly; ortholog analysis; bioinformatics.

Введение

Симбиотические микроорганизмы играют важную роль в обеспечении жизнедеятельности животных, в том числе – насекомых. Многие из таких симбионтов существенно влияют на физиологию своих хозяев и могут придавать им новые свойства, позволяющие адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды, расширять ареал, заселять различные биотопы и изменять трофическую специализацию [1]. Настоящие тли (Aphididae) представляют собой один из наиболее ярких примеров организмов, сильно зависящих от своих симбионтов. Известны две группы симбионтов: первичные облигатные – это *Buchnera aphidicola* Munson et al. 1991 (Gammaproteobacteria: Enterobacterales: Erwiniaceae), заселяющая бактериоциты и поставляющая насекомому-хозяину дополнительные аминокислоты, а также вторичные факультативные, которые могут быть тканевыми, гемоцельными или кишечными, обеспечивающими разнообразными селективными преимуществами насекомым, в которых они обитают, в том числе термотолерантность, устойчивость к некоторым инсектицидам, патогенами или паразитам [2; 3].

До недавнего времени считалось, что единственная функция *B. aphidicola* в организме тлей – синтез аминокислот, отсутствующих или крайне мало представленных во флоэмном соке растений. Однако в последние годы появилась информация, позволяющая поставить это утверждение под вопрос. *B. aphidicola* участвует в формировании устойчивости тлей к абиотическим и биотическим стресс-факторам. В частности, стало известно, что наиболее активная продукция СУР6СУ3 – основного фермента тлей, обеспечивающего нейтрализацию неоникотиноидов – осуществляется именно в бактериоцитах, заселенных *B. aphidicola* [4]. Более того, установлено, что устойчивость тлей к авермектину не связана с усилением экспрессии каких-либо генов системы детоксикации тлей, но положительно коррелирует с плотностью *B. aphidicola* в их тканях. В этом же исследовании было показано, что после снижения количества *B. aphidicola* с помощью микроинъекций антибиотиков, тли восстанавливают чувствительность к имидаклоприду и сульфоксафлору [5]. В частности, продемонстрирована ее роль в адаптации к тепловому шоку, сопротивлению грибным инфекциям, а также в способности осваивать новые кормовые растения и ареалы обитания [6–8]. Все это делает *B. aphidicola* не только важным объектом фундаментальных исследований в области эволюционной биологии и симбиоза, но и потенциальной мишенью в разработке новых стратегий биологического контроля вредителей.

За миллионы лет симбиоза с тлями *B. aphidicola* подверглась значительной редукции генома и потеряла способность к автономному существованию вне организма хозяина. В процессе этой эволюционной трансформации *B. aphidicola* утратила многочисленные гены, включая ответственные за репарацию ДНК, регуляцию экспрессии генов, клеточное деление и синтез компонентов клеточной стенки. Совокупно, по оценкам, бактерия утратила около 70 % от предполагаемого количества генов, имеющихся у свободноживущих предков, что сделало ее геном одним из самых маленьких, среди всех известных клеточных организмов [9].

Редуцированный геном *B. aphidicola* отличается крайней стабильностью, характеризуется высоким уровнем минимализма и отсутствием горизонтального переноса генов, что обусловлено как изоляцией в клетке хозяина, так и утратой систем, ответственных за рекомбинацию. При этом, несмотря на значительное сокращение, в геноме сохраняются кластеры, обеспечивающие синтез незаменимых аминокислот, в частности триптофана, лейцина, изолейцина, валина и гистидина, что указывает на его специализированную метаболическую направленность. Такая консервация функционально значимых путей свидетельствует о глубокой коэволюционной зависимости между тлей и ее эндосимбионтом.

Внимание исследователей привлекают плазмидные локусы в геноме *B. aphidicola*, которые в разных штаммах могут сохранять функциональность, подвергаться мутациям или даже исчезать. Эти различия имеют важное значение для оценки степени метаболической зависимости между симбионтом и хозяином, а также позволяют судить о наличии или отсутствии компенсаторных функций со стороны вторичных симбионтов.

В работе мы представляем результаты сборки и сравнительного анализа геномов *B. aphidicola* из 5 видов тлей фауны Беларуси, которые являются известными вредителями сельскохозяйственных культур растений. Эти виды включают: *Brevicoryne brassicae* Linnaeus, 1758 – поражает растения семейства Капустные, *Macrosiphum albifrons* Essig, 1911 – поражает растения рода люпин, *Acyrtosiphon caraganae* Cholodkovsky, 1908 – олигофаг, поражающий растения семейства Бобовые, *Aphis craccivora* Koch, 1854 – полифаг, преимущественно поражающий растения семейства Бобовые и представляющий наибольшую угрозу среди данных видов тлей, полифаг *Myzus persicae* Sulzer, 1776, который в различные периоды жизненного цикла поражает плодовые древесные растения рода слива, овощные культуры семейств Пасленовые, Маревые, Астровые, Капустные и Тыквенные.

Материалы и методы исследования

Имаго тлей собраны в следующих регионах Беларуси: *M. persicae*, *B. brassicae* и *M. albifrons* – г. Минск, *A. caraganae* – на берегу оз. Нарочь, *A. craccivora* – г. Логойск. Более подробная информация доступна в базе данных BioSample по кодам доступа (табл. 1). Видовая принадлежность коллектированных образцов была определена по морфологическим ключам и подтверждена результатами ДНК-штрихкодирования.

После сбора образцы тлей помещали в микропробирки с 96 % раствором этанола и хранили в морозильной камере при температуре -20 °C. Метагеномную ДНК выделяли набором «Blood-Animal-Plant DNA Preparation Kit» (Jena Bioscience, Германия) согласно рекомендациям производителя. Выделенную ДНК хранили при температуре -20 °C до транспортировки в лабораторию Macrogen (Южная Корея), где на ее основе были сконструированы библиотеки ДНК для секвенирования. Оно производилось на секвенаторах MiSeq (Иллюмина) в лаборатории Macrogen. В результате были получены необработанные данные секвенирования формата FASTQ, представляющие собой парные прочтения ДНК длиной 151 п. н. Количество прочтений для образцов составило: *M. persicae* – 172 099 440, *M. albifrons* – 134 396 409, *A. craccivora* – 150 614 057, *A. caraganae* – 144 682 122, *B. brassicae* – 149 291 825.

Полногеномные данные секвенирования были выгружены в базу данных SRA (Sequence Read Archive) под номерами SRR9903619, SRR9925340, SRR9925395, SRR9901306, SRR9925396. Парные прочтения картировались на референсные геномы *B. aphidicola*, доступные в базе данных GenBank по состоянию на ноябрь 2022 г. Локальное картирование осуществлялось в программе Bowtie2 [10]. Сборка картированных прочтений *de novo* осуществлялась программой SPAdes 3.14.0 [11]. Структурная и функциональная аннотация геномов *B. aphidicola*, а также генерация файлов нуклеотидных и аминокислотных последовательностей для дальнейшего анализа, проводилась с помощью программы NCBI Prokaryotic Genome Annotation Pipeline (PGAP Software revision:6.3a). Дополнительно полученные данные аннотации сверялись с результатами программы RAST Server и Prokka [12; 13].

Функциональный анализ генов проводился в программе COGclassifier [14]. Поиск ортологичных кластеров генов, визуализация количества общих кластеров и уникальных кластеров в виде диаграмм Венна осуществлялись с помощью веб-сервиса OrthoVenn2 [15]. Для поиска ортологичных кластеров выбиралось пороговое значение ошибки 10^{-15} , значение инфляции 1,5. Представление плазмидных последовательностей в виде кольцевых карт проводилось в программах Proksee [16] и UGENE [17].

Результаты исследования и их обсуждение

Итак, было собрано 5 геномов *B. aphidicola* тлей видов *M. persicae*, *M. albifrons*, *A. craccivora*, *A. caraganae*, *B. brassicae*. Каждый полученный геном представлен консенсусными последовательностями ДНК – 1 хромосомой и 2 кольцевыми плазмидами. Исходные данные секвенирования, метаданные с характеристиками образцов тлей и непосредственно полученные сборки были депонированы в базу данных *GenBank* (табл. 1).

Таблица 1

Коды доступа (КД) к исходным данным секвенирования, сборкам геномов *B. aphidicola* и характеристике образцов тлей

Table 1

Access codes for sequencing data, *B. aphidicola* genome assemblies, and characterization of aphid samples

Вид тлей-хозяев	КД SRA	GenBank КД сборки	BioSample КД
<i>Acyrtosiphon caraganae</i>	SRR9925395	GCA_026684235.1	SAMN31681969
<i>Aphis craccivora</i>	SRR9901306	GCA_026684215.1	SAMN31677943
<i>Brevicoryne brassicae</i>	SRR9903619	GCA_026684255.1	SAMN31681002
<i>Macrosiphum albifrons</i>	SRR9925340	GCA_026684195.1	SAMN31681061
<i>Myzus persicae</i>	SRR9925396	GCA_026684135.1	SAMN31681949

На данный момент род *Buchnera* условно разделяют на две ветви в соответствии с размером генома: «большие» геномы, размером более 600 тыс. п. н., и «малые», с размером немногим более 400 тыс. п. н. [18]. Все 5 исследуемых *B. aphidicola* следует отнести к ветви с «большими» или полными геномами, так как длины их нуклеотидных последовательностей превышают 600 тыс. п. н. Структура генома, количество кодирующих генов, псевдогенов, последовательностей РНК у *B. aphidicola* из тлей, коллектированных в Беларуси, незначительно отличалась от ранее опубликованных данных аннотаций *B. aphidicola* тлей соответствующих родов. Сравнительная таблица размеров хромосом *B. aphidicola* и их GC-состава для геномов белорусских штаммов и штаммов близкородственных видов тлей других регионов представлена в табл. 2.

В геномах *B. aphidicola* наблюдалась характерная для этих симбионтов высокая плотность генов. В среднем она составила 1,02–1,03 на тысячу пар нуклеотидных оснований для исследованных штаммов. Единственная область, обладающая вариабельностью среди различных филогенетических линий *B. aphidicola*, – это область генов, локализующихся в хромосоме *ygfZ-prfB-lysS-lysA-lgt-thyA* и *lipA-pyrF-ribA*, порядок следования которых у различных штаммов может отличаться [19]. Все 5 изучаемых геномов *B. aphidicola* показывают указанный порядок генов в этих двух регионах.

Как отмечалось ранее, в отношении используемых кодонов в геноме *B. aphidicola* есть склонность к использованию С-оканчивающихся триплетов для генов с высокой экспрессией и А/Т-оканчивающихся триплетов для генов с низкой экспрессией [20]. Это, предположительно, вызвано давлением эволюционного отбора по признаку эффективности трансляции мРНК генов и разной доступностью отдельных нуклеотидов в геномах облигатных симбионтов, к которым относится *B. aphidicola*. Предпочтение кодонов в высокоэкспрессируемых генах зачастую коррелирует с повышенной продукцией белков и, в целом, с увеличением приспособленности организмов к изменяющимся условиям окружающей среды [21]. Данное явление наблюдается и в анализируемых геномах, что продемонстрировано на графике использования синонимичных кодонов у *B. aphidicola* (*M. albifrons*) для 20 аминокислот (рис. 1). Распределение концевых нуклеотидов: А – 37 %, С – 5, G – 13, Т – 45 %. Такая тенденция наблюдается у всех исследованных штаммов *B. aphidicola* без каких-либо значительных отличий.

В результате поиска ортологических групп было выявлено, что 542 кластера генов, являющихся общими для всех 5 штаммов, то есть примерно 95 % генов различных *B. aphidicola* являются идентичными в своем функциональном значении и содержат гены, критически важные для поддержания жизнеспособности бактерий (рис. 2). В состав кластеров, не попавших в список общих для всех 5 геномов, вошли гены, отвечающие за репарацию, биосинтез триптофана, регуляцию транскрипции и трансляции, синтез клеточной стенки, синтез липидов, гены металлорегуляторных белков. При этом ни один исследуемый штамм *B. aphidicola* не обладал уникальными генами.

Таблица 2

Длины ДНК последовательностей и GC-состав геномов *B. aphidicola*
изучаемых штаммов и штаммов других регионов

Table 2

Lengths of DNA sequences and their GC composition of genomes of *B. aphidicola*
of the studied strains and strains from other regions

Образец	GenBank КД	Длина последовательно-сти, п. н.	GC содержание, %	GenBank КД (плазмиды)	Длина последовательности (плазмиды), п. н.
<i>Myzus persicae</i>	CP113412.1 (Беларусь)	643 511	25	CP113413.1 CP113414.1	7 802 2 907
	CP002697.1 (США)	643 504	25	CP002698.1 —	7 802 —
<i>Aphis craccivora</i>	CP113403.1 (Беларусь)	632 746	24	CP113404.1 CP113405.1	7 657 2 970
	CP043999.1 (США)	632 731	24	CP044000.1 CP044001.1	7 658 2 970
<i>Acyrtosiphon caraganae</i>	CP113415.1 (Беларусь)	642 370	25,5	CP113416.1 CP113417.1	7 912 3 771
<i>Acyrtosiphon lactucae</i>	CP034891.1 (США)	642 335	24	CP034892.1 CP034893.1	7 888 3 264
<i>Brevicoryne brassicae</i>	CP113406.1 (Беларусь)	643 005	25	CP113407.1 CP113408.1	7 873 2 977
	CP034882.1 (США)	645 850	25	CP034883.1 CP034884.1	7 866 2 913
<i>Macrosiphum albifrons</i>	CP113409.1 (Беларусь)	644 375	25,5	CP113410.1 CP113411.1	7 794 3 200
<i>Macrosiphum euphorbiae</i>	CP033006.1 (США)	645 334	25,5	—	—

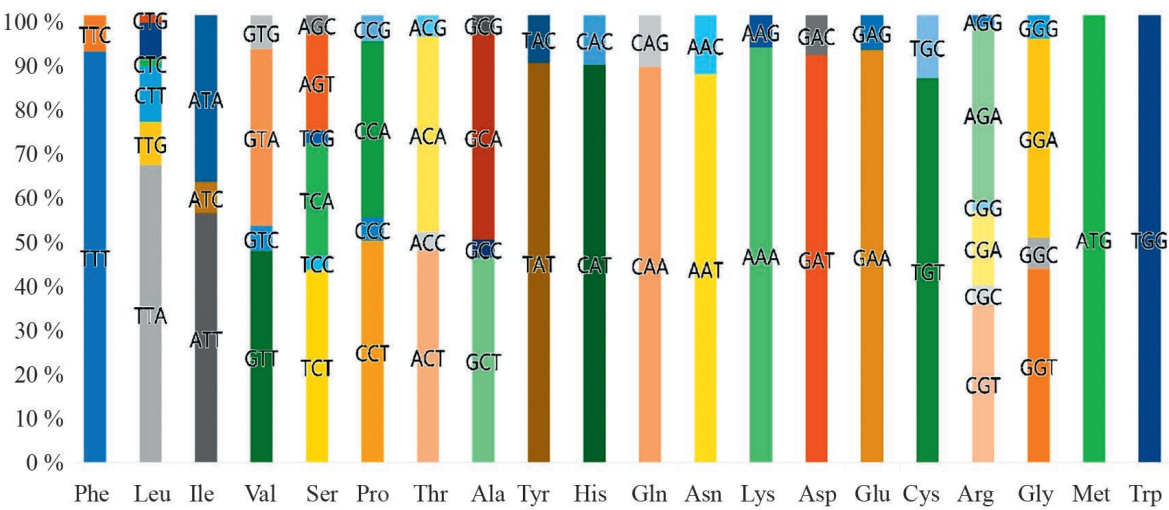


Рис. 1. Предпочтение кодонов в кодирующих последовательностях генома *B. aphidicola* (*M. albifrons*)

Fig. 1. Codon bias in *B. aphidicola* (*M. albifrons*) genome coding sequences

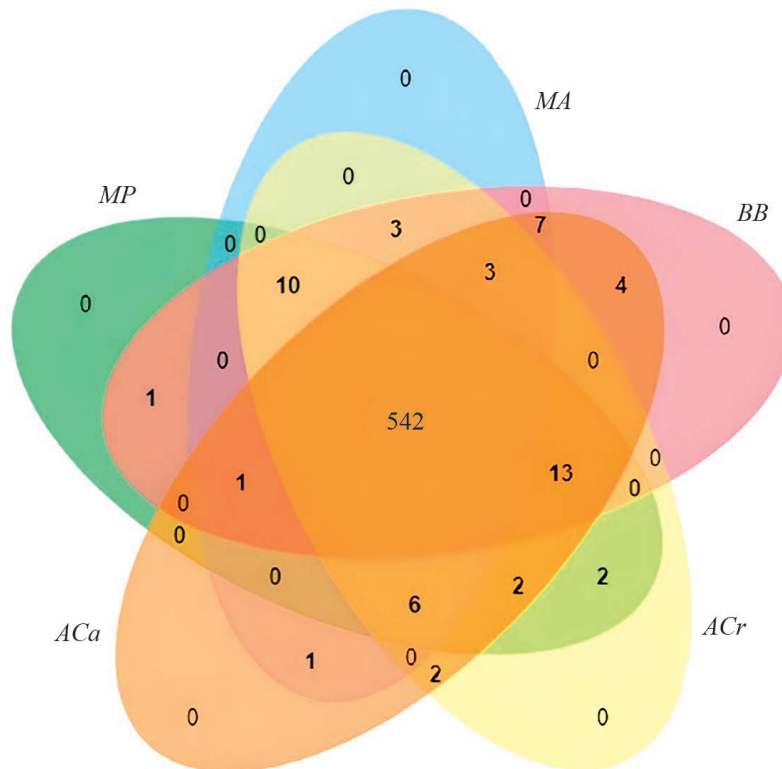


Рис. 2. Диаграмма Венна, отражающая количество общих кластеров ортологов у *B. aphidicola* из 5 видов тлей.

Fig. 2. Venn diagram showing the number of shared clusters of orthologs in *B. aphidicola* of 5 aphid species

Функциональная аннотация генов *B. aphidicola* показала, что 10 % всего количества генов бактерии приходится на гены, отвечающие за метаболизм аминокислот. Это связано с симбиотической функцией *B. aphidicola* и характерно для всех ее штаммов. Примерно треть всех генов отвечает за метаболические пути синтеза и деградации веществ, с которыми *B. aphidicola* обменивается со своим хозяином тлей. Как и у других *B. aphidicola*, анализируемые бактерии утратили практически все гены регуляции генома (более 90 % при сравнении последнего реконструированного симбиотического предка всех современных *B. aphidicola* и *Escherichia coli*) и сейчас их общее количество составляет не более 3 % от всего количества генов [22]. Различия состоят в наличии/отсутствии у одних штаммов дополнительных генов, отвечающих за процессы репарации, репликации, регуляции генома, пиримидинового метаболизма и синтеза пептидогликана. Предположительно, данные категории генов подвергаются негативному селективному отбору у *B. aphidicola* и в дальнейшем будут утрачены во всех линиях.

Генный состав и само наличие плазмид у *B. aphidicola* является пластичным признаком [23]. В случае же анализируемых штаммов *B. aphidicola* у всех бактерий были выявлены по две плазмиды, условно называемые «лейциновой» *pLeu* и «триптофановой» *pTrp* (рис. 3). Лейциновые плазмиды всех штаммов имеют одинаковый состав: два гена, ответственных за репликацию – *repA*, гены синтеза лейцина, дополняющие соответствующие гены из хромосомной ДНК – *leuABCD* и ген, гомологичный гену *yqhA* *E. coli* синтеза интегрального мембранного белка. Триптофановые плазмиды предсказуемо содержат гены биосинтеза триптофана *trpEG*, но только у *B. aphidicola* (*A. caraganae*) присутствует ген контроля репликации плазмиды. Кроме того, согласно полученной аннотации, гены *trpE* у штамма *M. persicae* и *trpG* у штамма *A. craccivora* могут быть дефектными, исходя из наличия сдвига рамки считывания в случае со штаммом из *M. persicae* и потеря участка С-терминала у штамма из *A. craccivora*, при этом не обнаружено аналогов этих генов в хромосомной ДНК.

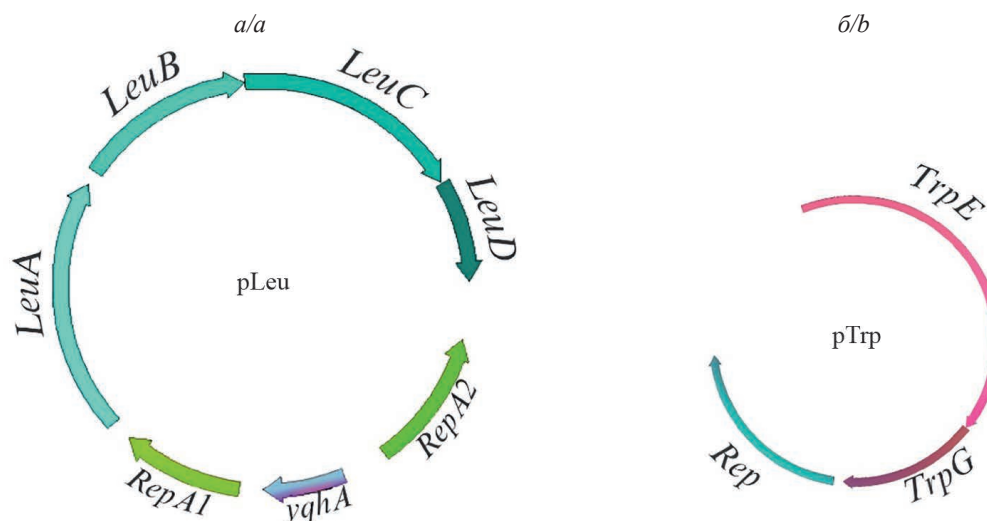


Рис. 3. Генетические карты плазмид *B. aphidicola*, содержащих гены синтеза лейцина (а) и триптофана (б)

Fig. 3. Genetic maps of *B. aphidicola* plasmids containing genes for leucine (a) and tryptophan (b) synthesis

Заключение

Геномы *B. aphidicola* из пяти видов тлей (*M. persicae*, *M. albifrons*, *A. craccivora*, *A. caraganae* и *B. brassicae*) были собраны в 15 нуклеотидных последовательностей (5 хромосомных и 10 плазмидных). Последовательности представляют полные геномы *B. aphidicola* данных видов тлей и доступны по следующим кодам доступа GenBank: GCA_026684135.1, GCA_026684195.1, GCA_026684215.1, GCA_026684235.1, GCA_026684255.1.

Размеры геномов и общее количество генов *B. aphidicola* составили: 654 220 п. н., 632 гена (*M. persicae*); 643 373 п. н., 628 генов (*A. craccivora*); 654 053 п. н., 630 генов (*A. caraganae*); 653 855 п. н., 637 генов (*B. brassicae*); 655 369 п. н., 631 ген (*M. albifrons*).

Проведенная структурная и функциональная аннотация выявила отсутствие значительных генетических различий между геномами *B. aphidicola* из тлей, собранных на территории Беларуси, и геномами *B. aphidicola* из тлей близкородственных видов, ранее представленных в GenBank. У штаммов симбионта *M. persicae* и *A. craccivora* обнаружена псевдогенизация последовательностей, отвечающих за промежуточные этапы синтеза триптофана. Подтверждение способности или неспособности к синтезу этой аминокислоты может быть в дальнейшем достигнуто экспериментальными методами.

Библиографические ссылки / References

1. Provorov NA, Onishchuk OP. Microbial symbionts of insects: genetic organization, adaptive role, and evolution. *Microbiology*. 2018;87(2):151–163. DOI: 10.1134/s002626171802011x.
2. Douglas AE. Nutritional interactions in insect-microbial symbioses: aphids and their symbiotic bacteria *Buchnera*. *Annual Review of Entomology*. 1998;43(1):17–37. DOI: 10.1146/annurev.ento.43.1.17.
3. Zytynska SE, Weisser WW. The natural occurrence of secondary bacterial symbionts in aphids. *Ecological Entomology*. 2016;41(1):13–26. DOI: 10.1111/een.12281.
4. Singh KS, Troczka BJ, Duarte A, et al. The genetic architecture of a host shift: an adaptive walk protected an aphid and its endosymbiont from plant chemical defenses. *Science Advances*. 2020;6(19):eaba1070. DOI: 10.1126/sciadv.aba1070.
5. Guo SK, Gong YJ, Chen JC, et al. Increased density of endosymbiotic *Buchnera* related to pesticide resistance in yellow morph of melon aphid. *Journal of Pest Science*. 2020;93(4):1281–1294. DOI: 10.1007/s10340-020-01248-0.
6. Tougeron K, Iltis C. Impact of heat stress on the fitness outcomes of symbiotic infection in aphids: a meta-analysis. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2022;289:2660. DOI: 10.1098/rspb.2021.2660.
7. Gao Y, Ren Y, Chen J, et al. Effects of fungicides on fitness and *Buchnera* endosymbiont density in *Aphis gossypii*. *Pest Management Science*. 2023;79(11):4282–4289. DOI: 10.1002/ps.7625.
8. Zhang YC, Cao WJ, Zhong LR, Godfray H CJ, Liu XD. Host plant determines the population size of an obligate symbiont (*Buchnera aphidicola*) in aphids. *Applied and Environmental Microbiology*. 2016;82(8):2336–2346. DOI: 10.1128/aem.04131-15.
9. Gómez-Valero L, Silva FJ, Christophe Simon J, Latorre A. Genome reduction of the aphid endosymbiont *Buchnera aphidicola* in a recent evolutionary time scale. *Gene*. 2007;389(1):87–95. DOI: 10.1016/j.gene.2006.10.001.
10. Langmead B, Salzberg SL. Fast gapped-read alignment with Bowtie 2. *Nature Methods*. 2012;9(4):357–359. DOI: 10.1038/nmeth.1923.
11. Pribelski A, Antipov D, Meleshko D, Lapidus A, Korobeynikov A. Using SPAdes *de novo* assembler. *Current Protocols in Bioinformatics*. 2020;70(1):e102. DOI: 10.1002/cpbi.102.

12. Aziz RK, Bartels D, Best AA, et al. The RAST server: rapid annotations using subsystems technology. *BMC Genomics*. 2008;9(1):75. DOI: 10.1186/1471-2164-9-75.
13. Seemann, T. Prokka: rapid prokaryotic genome annotation. *Bioinformatics*. 2014;30(14):2068–2069. DOI: 10.1093/bioinformatics/btu153.
14. Tatusov RL, Galperin MY, Natale DA, Koonin EV. The COG database: a tool for genome-scale analysis of protein functions and evolution. *Nucleic Acids Research*. 2000;28(1):33–36. DOI: 10.1093/nar/28.1.33.
15. Xu L, Dong Z, Fang L, et al. OrthoVenn2: a web server for whole-genome comparison and annotation of orthologous clusters across multiple species. *Nucleic Acids Research*. 2019;47(W1):W52–W58. DOI: 10.1093/nar/gkz333.
16. Grant JR, Enns E, Marinier E, et al. Proksee: in-depth characterization and visualization of bacterial genomes. *Nucleic Acids Research*. 2023;51(W1):W484–W492. DOI: 10.1093/nar/gkad326.
17. Okonechnikov K, Golosova O, Fursov M. Unipro UGENE: a unified bioinformatics toolkit. *Bioinformatics*. 2012;28(8):1166–1167. DOI: 10.1093/bioinformatics/bts091.
18. Lu C, Zou T, Liu Q, Huang X. Twenty-nine newly sequenced genomes and a comprehensive genome dataset for the insect endosymbiont *Buchnera*. *Scientific Data*. 2024;11(1):673. DOI: 10.1038/s41597-024-03537-0.
19. Van Ham RCHJ, Kamerbeek J, Palacios C, et al. A reductive genome evolution in *Buchnera aphidicola*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2003;100(2):581–586. DOI: 10.1073/pnas.0235981100.
20. Parvathy ST, Udayasuriyan V, Bhadana V. Codon usage bias. *Molecular Biology Reports*. 2022;49(1):539–565. DOI: 10.1007/s11033-021-06749-4.
21. Iriarte A, Lamolle G, Musto H. Codon usage bias: an endless tale. *Journal of Molecular Evolution*. 2021;89(9–10):589–593. DOI: 10.1007/s00239-021-10027-z.
22. Chong RA, Park H, Moran NA. Genome evolution of the obligate endosymbiont *Buchnera aphidicola*. *Molecular Biology and Evolution*. 2019;36(7):1481–1489. DOI: 10.1093/molbev/msz082.
23. Latorre A, Gil R, Silva FJ, Moya A. Chromosomal stasis versus plasmid plasticity in aphid endosymbiont *Buchnera aphidicola*. *Heredity*. 2005;95(5):339–347. DOI: 10.1038/sj.hdy.6800716.

Статья поступила в редколлегию 17.07.2025.
Received by editorial board 17.07.2025.

УДК 582.711.31:581.2

СОДЕРЖАНИЕ ЭКЗОГЕННЫХ И ЭНДОГЕННЫХ БРАССИНОСТЕРОИДОВ В ЛУКОВИЧНЫХ КУЛЬТУРАХ РОДОВ *TULIPA* И *HYACINTHUS*

Т. В. КАЛЕНЧУК¹⁾, А. Г. ЧЕРНЕЦКАЯ²⁾

¹⁾Полесский государственный университет,
ул. Днепровской флотилии, 23, 225710, г. Пинск, Беларусь

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

Луковичные растения занимают одно из ведущих мест среди огромного разнообразия травянистых многолетников. К этой группе относятся такие весеннецветущие культуры, как тюльпаны и гиацинты. Объединяет их наличие подземного запасающего органа – луковицы и схожесть жизненного цикла, хотя относятся они к разным семействам: тюльпаны – самые яркие представители семейства лилейных (*Liliaceae* L.), а гиацинты – семейства гиацинтовых (*Hyacinthaceae* L.). Применение биологически активных веществ в цветоводстве позволяет более полно реализовать потенциальные возможности растений за счет регулирования таких важных процессов, как закладка и рост корней, рост стебля, листьев, переход к цветению, продолжительность цветения, а также за счет снижения повреждающего действия неблагоприятных факторов окружающей среды. Установлено, что при обработке различных цветочно-декоративных культур в концентрациях 0,00025 % (эпибрасинолид) и 0,000375 % (гомобрасинолид) на литр водного раствора наблюдается заметный ростостимулирующий и адаптогенный эффект, приводящий к увеличению сроков цветения, повышению качества продукции и устойчивости растений к неблагоприятным условиям и болезням. Известно также, что некоторые синтетические аналоги брасиностероидов проявляют заметную биологическую активность, сопоставимую с природными аналогами. Эти факторы обуславливают научный и практический интерес к синтезу и исследованию производных брасиностероидов, а также к разработке удобных, высокочувствительных и быстрых методов их анализа. Впервые в Беларуси нами изучено влияние брасиностероидов на морфометрические параметры 22 сортов тюльпанов, 10 сортов гиацинтов. В работе показаны результаты проведения иммуноферментного анализа эндогенного содержания брасиностероидов в органах растений рода *Tulipa* L. и *Hyacinthus* L. Эндогенное содержание брасиностероидов (БС) в вегетативных и генеративных органах луковичных растений показало, что количество гормонов в луковицах и побегах в десятки раз превышает их содержание в цветах.

Ключевые слова: фитогормоны; эпибрасинолиды; гомобрасинолиды; *Tulipa*; *Hyacinthus*; иммуноферментный анализ.

Образец цитирования:

Каленчук ТВ, Чернецкая АГ. Содержание экзогенных и эндогенных брасиностероидов в луковичных культурах родов *Tulipa* и *Hyacinthus*. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2025;3:42–50.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-42-50>

For citation:

Kalenchuk TV, Chernetskaya AG. Content of exogenous and endogenous brassinosteroids in bulbous crops of the genera *Tulipa* and *Hyacinthus*. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2025;3:42–50. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-42-50>

Авторы:

Татьяна Владимировна Каленчук – старший преподаватель кафедры биохимии и биоинформатики.
Алла Георгиевна Чернецкая – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий кафедрой общей биологии и генетики.

Authors:

Tatiana V. Kalenchuk, senior lecturer at the department of biochemistry and bioinformatics.
chrysanthemum@list.ru
Alla G. Chernetskaya, PhD (agriculture), docent; head of the department of general biology and genetics.
chealval@gmail.com

CONTENT OF EXOGENOUS AND ENDOGENOUS BRASSINOSTEROIDS IN BULBOUS CROPS OF THE GENERA *TULIPA* AND *HYACINTHUS*

T. V. KALENCHUK^a, A. G. CHERNETSKAYA^b

^aPolessky State University,

23 Dneprovskoy Flotilii Street, Pinsk 225710, Belarus

^bInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,

23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

Corresponding author: T. V. (@bk.ru)

Bulbous plants occupy one of the leading positions among the vast diversity of herbaceous perennials. This group includes spring-flowering crops such as tulips and hyacinths. They are united by the presence of an underground storage organ – the bulb and by the similarity of their life cycle, although they belong to different families: tulips are the brightest representatives of the *Liliaceae* L. family, while hyacinths belong to the *Hyacinthaceae* L. family. The use of biologically active substances in floriculture allows for a fuller realization of the potential capabilities of plants by regulating such important processes as root formation and growth, stem and leaf development, transition to flowering, duration of flowering, as well as by reducing the damaging effects of adverse environmental factors. It has been established that treatment of various ornamental-flowering crops with concentrations of 0.00025 % (epibrassinolide) and 0.000375 % (homobrassinolide) per liter of aqueous solution results in a noticeable growth-promoting and adaptogenic effect, leading to extended flowering periods, improved product quality, and enhanced plant resistance to unfavorable conditions and diseases. It is also known that some synthetic analogs of brassinosteroids exhibit significant biological activity comparable to that of natural brassinosteroids [2]. These factors determine the scientific and practical interest in the synthesis and study of brassinosteroid derivatives, as well as in the development of convenient, highly sensitive, and rapid methods of their analysis. For the first time in Belarus, we studied the influence of brassinosteroids on the morphometric parameters of 22 tulip cultivars and 10 hyacinth cultivars. The article presents the results of enzyme immunoassay analysis of endogenous brassinosteroid content in the organs of plants of the genera *Tulipa* L. and *Hyacinthus* L. Determination of endogenous brassinosteroid levels in the vegetative and generative organs of bulbous plants showed that the amount of hormones in bulbs and shoots exceeds their content in flowers by dozens of times.

Keywords: phytohormones; epibrassinolides; homobrassinolides; *Tulipa*; *Hyacinthus*; enzyme immunoassay.

Введение

Браassinостероиды – стрессовые адаптогены, обладающие сильной фиторосто-стимулирующей активностью. Их отличительная особенность – действие на рост растений в очень низких концентрациях (1–200 частей на миллиард). Установлено, что индукция активности α -амилазы и прорастание семян ячменя вызываются экзогенным эпибрасинолидом (ЭБ) в концентрации 10^{-8} М, в то время как гиббереллином – 10^{-4} М [1]. Рострегулирующий эффект соединений проявлялся при введении экзогенного ЭБ в растения различными способами: полусухой обработкой семян, их инкрустацией и замачиванием, а также опрыскиванием растений.

Скорость поглощения и передвижения эпибрасинолида (ЭБ) в растениях является очень важным показателем механизма действия этого регулятора. Поступление и транспорт ^{14}C -эпибрасинолида в корни, молодые и зрелые листья, апексы проростков огурца и пшеницы показали [2], что при введении препарата в корни ^{14}C -эпибрасинолид легко усваивался и быстро транспортировался у обоих видов растений.

Попытки объяснить механизм рострегулирующих реакции, обусловленных действием ЭБ, остаются пока до конца не выясненными. Вместе с тем получен большой объем данных, свидетельствующих о наличии сложных взаимодействий ЭБ с фитогормональной системой растений. Установлено, что браassinостероиды изменяют ауксиновый обмен растений ячменя, усиливают биосинтез индолилуксусной кислоты (ИУК), подавляют или не изменяют активность оксидазы ИУК. В связи с этим эффект БС на вегетативный рост растений объясняется его воздействием сначала на содержание и активность ауксинов и цитокининов, а затем на уровень абсцизовой кислоты (АБК) и оксикоричных кислот, что обуславливает переход растений от вегетативного состояния к генеративному [3].

На территории нашей республики активно проводились исследования в области влияния гормонов роста на цветочно-декоративные культуры.

В 2017 г. А. А. Думнова, изучая влияния различных субстратов на зимнюю выгонку растений рода *Lilium*, при использовании фитостимуляторов определила, что длина цветоносов меняется в зависимости от типа грунта и применяемого фитостимулятора. Лилии сорта Курьер, обработанные эпином и цирконом, показали лучшую динамику роста на специальном грунте и перлите. Кроме того, увеличение длины

цветоноса происходило не рывками, а равномерно на протяжении всего выгоночного периода. Другие субстраты дали более короткий цветонос [4].

В статье Г. М. Пугачевой и др. [5] представлены результаты обработок луковичек трубчатых лилий регуляторами роста перед посадкой и во время вегетации. Максимальное увеличение энергии прорастания (до 47 %) отмечалось под влиянием обработки новосилом (2 мл/л). Во время вегетации обработка лариксином (0,3 мл/л) дала увеличение биометрических показателей (количество листьев увеличилось на 45 %, суммарная площадь листьев – 69, диаметр луковичек – 25 % по сравнению с контролем). Эмистим с нормой расхода 1 мл/га на азиатских лилиях положительно повлиял на высоту растений, диаметр цветов и длину листьев [6].

В статьях А. А. Хугаевой рассматривается возможность применения некоторых стимуляторов роста для выращивания рассады цветочных культур. Данные препараты повышают всхожесть семян, стойкость растений к заболеваниям и оказывают положительное влияние на декоративные качества цветочных культур. Результатом использования ростостимуляторов становится возможность создания красивых, декоративно-функциональных цветников для озеленения городской среды. Ей установлено, что все препараты проявили явный эффект стимулирования, по интенсивности влияния на всхожесть семян определен Эпин-Экстра, всхожесть семян – 77–88 % [6].

Экологически безопасные высокоэффективные регуляторы роста растений для цветочно-декоративных культур изучали К. Е. Усова, С. Л. Белопухов, И. Г. Шайхиев. Ученые использовали для этого широко применяемые на цветочно-декоративных культурах препараты «Эпин» и «Эпин-Экстра», действующим веществом (д. в.) которых является 2,4-эпибрассинолид, принадлежащий к классу брассиностероидов, природных гормонов растений. Он является эффективным иммуномодулятором, повышает устойчивость растений к стрессовым факторам, в том числе к воздействию пониженных температур и заморозкам. «Эпин» рекомендован к применению на таких цветочных культурах, как гладиолусы, тюльпаны, крокусы, гелениум, хризантеме корейской, на которых усиливает корнеобразование, рост растений, улучшает приживаемость после пересадки, ускоряет переход растений к цветению. Также применяется при черенковании роз для повышения процента укоренения. Действующее вещество «Эпина» – 2,4-эпибрассинолид, по данным М. А. Левой, повышает устойчивость тюльпанов классов Кауфмана и Грейга к серой гнили. Замачивание луковиц тюльпанов перед выгонкой на сутки в растворе эпина увеличивало в урожае количество луковиц крупных фракций (II и III разбора). Обработка эпином растений львиного зева вызывала увеличение высота растений в среднем на $14,8 \pm 0,7$ см [7].

Результаты исследований М. А. Левой позволяют сделать вывод, что обработка луковиц и растений тюльпанов класса Кауфмана и класса Грейга фиторегуляторами дает возможность более «экологично» повысить устойчивость растений и луковиц к вирусу пестролепестности в период вегетации, получить их более качественный урожай. Лучшие результаты получены при использовании эпибрассинолида с различной концентрацией и мальтамина. Проведенные исследования показали, что наиболее устойчивы сорта Brilliant, Whisper, Scarlet Baby, Oriental Beauty [7].

К вопросу оценки декоративных качеств срезочных сортов чайно-гибридной розы при выращивании на гидропонике обращался А. Н. Плешаков. Роза является лидером в культивировании срезочных культур, декоративность которой не вызывает сомнений. Повышение привлекательности букетных цветов является приоритетной задачей современного промышленного цветоводства. Ряд регуляторов роста растений способны значительно улучшить декоративные качества цветочно-срезочной продукции. При проведении исследований ученым доказано, что иммуномодуляторы, обладающие протекторными функциями, существенно увеличивали ценные декоративные и хозяйственные свойства сортов чайно-гибридных роз, выращиваемых на малообъемной гидропонике. При трехкратной обработке растений розы Эпином-Экстра отмечено повышение размера цветка и его махровости. Бордово-красный сорт Ред Наоми в меньшей степени подвергался инсоляционному воздействию солнечных лучей и сохранял типичную для этого сорта окраску. Применение регулятора роста повышало длину и прочность цветоноса. У чайно-гибридной розы сорта Аваланж заметно повышался срок стояния букета в вазоне [8].

Е. М. Старостенковой изучено влияние фиторегуляторов Гетероауксин и Эпин-Экстра на повышение коэффициента размножения луковиц гиацинта восточного методом крестообразного надрезания донца. Сделан вывод о положительном влиянии регуляторов роста и развития растений на образование «деток» гиацинта [9].

Сегодня востребованы экологически безопасные средства фитоиммунокоррекции на основе природных веществ. И брассиностероиды могут справиться с этим, ибо подготавливают ткани сельскохозяйственных культур к быстрому включению защитных реакций в момент проникновения инфекции. Например, рассматриваемые фитогормоны уменьшают степень поражения растений табака черной гнилью и вирусом табачной мозаики, увеличивают урожай листьев табака, улучшают качество их сырья, а также защищают картофель от фитофторы. Фитогормоны – важнейшие представители эндогенной регуляторной системы. Их отличительной чертой является способность действовать в очень малых дозах, выполняя роль

регуляторов основных физиологических процессов (деления и роста клеток, состояния покоя, регуляции работы устьиц и др.) [10]. Обработанные соответствующим препаратом перед закладкой на хранение его клубни меньше прорастают, не страдают от «атак» фитопатогенных микроорганизмов. Аналогичный эффект достигается при опрыскивании растений картофеля в фазу бутонизации. Стероидные гормоны, нанесенные на пестик цветка тритикале, повышают его устойчивость к заболеванию фузариозом.

Итак, обработка растений фитогармонами способствует преодолению негативного действия факторов разной природы, а следовательно, помогает повысить урожай. Поэтому важно продолжить изучение механизмов их действия, оценить роль в системе «почва – растение», определить эффект использования в зависимости от экологических условий. Тем более, что речь идет о технологиях, основанных на применении чрезвычайно низких количеств природных соединений (своего рода нанопестицидов), немутагенных, обладающих крайне незначительной токсичностью.

За последние 30 лет теория гормональной регуляции обогатилась огромным экспериментальным материалом. Показано, что каждый из фитогормонов связан с другими и проявляет свою активность в сочетании с действием всей системы, при этом соотношение компонентов в отдельных этапах онтогенеза различно.

Многие результаты теоретических исследований нашли применение в практике современного растениеводства [1]. Зная, какие эндогенные регуляторы роста важны на конкретном этапе, каждый из них необходим для нормального цветения и плодоношения. Таким образом, можно целенаправленно изменять темпы роста и развития растений. Синтезировано большое число химических препаратов, обладающих сходным с природными регуляторами роста действием, получены заводским способом природные фитогормоны [2].

Цель исследования – определение содержания экзогенных и эндогенных брассиностероидов в луковичных культурах сортов родов *Tulipa* L. и *Hyacinthus* L., входящих в коллекцию Центрального ботанического сада НАН Беларуси.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось в ИБОХ НАН Беларуси в лаборатории химии стероидов. Изучалось влияние 24-эпибрассинолида и 28-гомобрассинолида на рост и развитие 6 сортов гиацинтов и 10 сортов тюльпанов. Основными критериями отбора исследуемых сортов являлись новизна сорта в коллекции, небольшой коэффициент размножения и низкая устойчивость к заболеваниям.

Опыт ставился в 5 вариантах. Схема постановки опыта: обработка 2-кратная с интервалом 2 недели в стадии отрастания и начала бутонизации данных сортов. Вариант 1 – контроль (дистиллированная вода), вариант 2 – раствор ЭБ 10^{-7} , вариант 3 – раствор ЭБ 10^{-9} , вариант 4 – раствор ГБ 10^{-7} , вариант 5 – раствор ГБ 10^{-9} .

В каждом варианте обрабатывали по 15 растений в 4-кратной повторности. Растения обрабатывались методом опрыскивания, до стекания первой капли с листа, по методике С. П. Потапова использовался разбрызгиватель ручной $V = 1000$ мл.

Растительный материал собирали в стадии массового цветения каждого сорта для конкретной культуры. Из каждого варианта брали по три растения согласно, методики первичного сортоизучения цветочных по В. И. Болгову и др. (1998 г.). Для выделения фракций, содержащей брассиностероиды, из вегетативной (лист, луковича) и генеративной (цветок) части пробы собирали в полевых условиях по схеме опыта. Для определения эндогенного уровня БС растительные образцы подвергали глубокой заморозке при температуре -24°C и лиофильно высушивали. Лيوфилизацию растительных образцов проводили под вакуумом с помощью сублимационной камеры *FreeZone (Labconco, США)*. Лيوфилизированные образцы взвешивали, измельчали, гомогенизировали в 3–5 мл буферного раствора (0,05 М трис, pH 7,4). Буферный экстракт центрифугировали в течении 20 мин на центрифуге *BioSan LMC4200R (BioSan, Латвия, 3000 об./мин)*. Полученный супернатан разводили и количественно анализировали в нем содержание стероидных гормонов группы 24-эпибрассинолида и группы 28-гомобрассинолида методом двухстадийного иммуноферментного анализа.

Исследование динамики экзогенных и эндогенных брассиностероидов были выполнены на базе лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси с использованием разработанных иммуноферментных тест-систем.

Статистическую обработку полученных данных осуществляли с помощью программы *Microsoft Office Excel 2007*.

Нами проанализировано содержание основных групп брассиностероидов, отличающихся как по количеству атомов углерода в молекуле – С28 (24-эпибрассинолид) и С29 (28-гомобрассинолид), так и по конфигурации заместителей в боковой цепи – 24R-метил (24-эпибрассинолид) и 24S-этил (28-гомобрассинолид).

Результаты исследования и их обсуждение

К группе основных весеннецветущих культур относятся тюльпаны и гиацинты. Основными задачами цветоводов является получение здоровых и высокодекоративных растений, что включает увеличение сроков цветения, высоты побега и цветочного бокала, а также устойчивости растений к неблагоприятным условиям и болезням. Установлено, что при обработке различных цветочно-декоративных культур в концентрациях 0,00025 % (эпибрассинолид) и 0,000375 % (гомобрассинолид) на литр водного раствора наблюдается заметный ростостимулирующий и адаптогенный эффект, приводящий к повышению качества продукции. Известно также, что некоторые синтетические аналоги брассиностероидов проявляют заметную биологическую активность, сопоставимую с природными брассиностероидами [10].

Исследование динамики экзогенных и эндогенных брассиностероидов были выполнены на базе лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии НАН Беларуси с использованием отечественных иммуноферментных тест-систем. Нами было проанализировано содержание основных групп брассиностероидов, отличающихся как по количеству атомов углерода в молекуле – С28 (24-эпибрассинолид) и С29 (28-гомобрассинолид), так и по конфигурации заместителей в боковой цепи – 24R-метил (24-эпибрассинолид) и 24S-этил (28-гомобрассинолид) в вегетативных (луковица, побег) и генеративных (цветок) органах тюльпанов (табл. 1). Контролем служили необработанные растения. Проведен сравнительный анализ количества экзогенных и эндогенных брассиностероидов на примере 4 садовых групп 10 сортов тюльпанов разных сроков цветения: Дарвиновы (Ollioules, Golden Apeldoorn, Hatsuzakura), Фостера (Ognik, Purissima), Триумф (Dynasty, Leen van der Mark, Leo Visser), Бахромчатые (Fringed Golden Apeldoorn, Cummins).

Исследование эндогенного содержания БС в вегетативных и генеративных органах луковичных растений свидетельствует, что количество всех анализируемых групп стероидных гормонов в луковицах ($11,14 \pm 0,34$) в 62 раза превышало их содержание в цветах ($0,18 \pm 0,03$), в побегах ($4,33 \pm 0,23$) в 24 раза их содержания в цветках. В органах всех сортов тюльпанов, обработанных растворами в концентрации ЭБ10⁻⁷, ЭБ10⁻⁹, ГБ10⁻⁷ и ГБ10⁻⁹ количество всех анализируемых групп стероидных гормонов в луковицах ($43,66 \pm 0,89$) в 18 раз превышало их содержание в цветах ($2,41 \pm 0,20$), в побегах ($12,17 \pm 0,63$) в 5 раз их содержания в цветках (рис. 1). Полученные результаты коррелируются с ранее полученными данными по морфометрическим параметрам. При этом наилучшие результаты по накоплению брассиностероидов были получены при обработке луковиц ЭБ10⁻⁹ ($24,69 \pm 1,76$) и ГБ10⁻⁹ ($29,31 \pm 0,57$), что в 2 раза превышает контрольные измерения.

Также было проанализировано содержание основных групп брассиностероидов в вегетативных (луковица, побег) и генеративных (цветок) органах гиацинтов (табл. 2). Контролем служили необработанные растения. Проведен сравнительный анализ количества экзогенных и эндогенных брассиностероидов на примере 6 сортов гиацинтов разных сроков цветения и высоты: Anna Lisa, Perle Brilliante, Grand Maitre, Blue Eyes, La Victoire, Doctor Krueger (рис. 2).

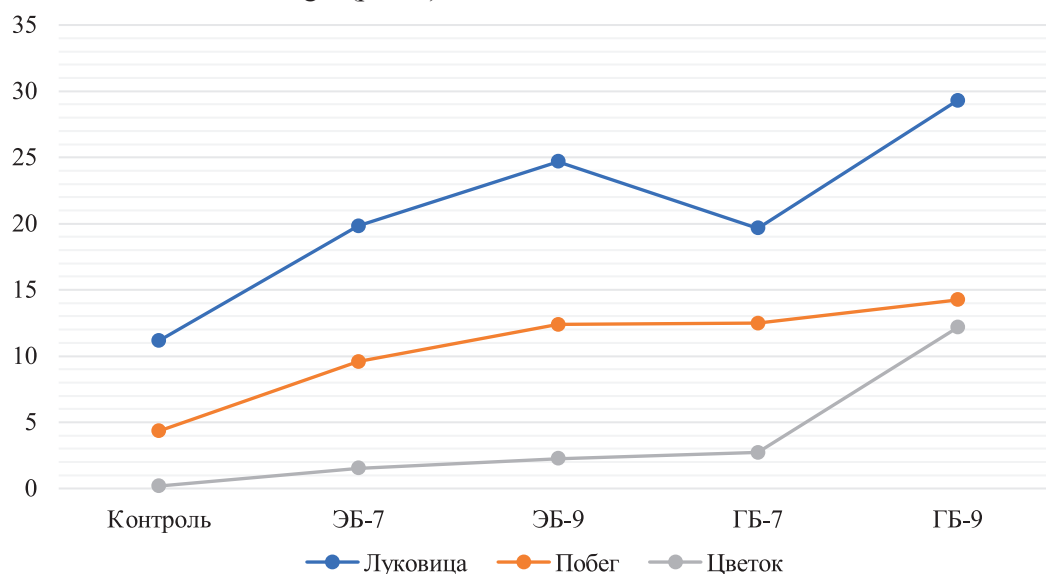


Рис. 1. Содержания брассиностероидов в органах растений рода *Tulipa*, мг

Fig. 1. Content of brassinosteroids in the organs of *Tulipa* plants, mg

Таблица 1

Экзогенные и эндогенные брассиностероиды в вегетативных и генеративных органах луковичных культур рода *Tulipa*

Table 1

Exogenous and endogenous brassinosteroids in the vegetative and generative organs of bulbous crops of the genus *Tulipa*

Название сорта	Органы растения	Среднее количество брассиностероидов, мг*				
		Контроль	24-эпибрасинолид		28-гомобрасинолид	
			10 ⁻⁷	10 ⁻⁹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁹
Ollioules	Луковица	11,30 ± 0,34	20,07 ± 1,12	24,38 ± 2,22	17,44 ± 0,25	21,41 ± 0,23
	Побег	3,31 ± 0,28	8,24 ± 0,46	10,74 ± 0,84	9,52 ± 0,42	10,97 ± 0,61
	Цветок	0,11 ± 0,02	0,91 ± 0,12	1,5 ± 0,21	1,82 ± 0,17	1,92 ± 0,08
Golden Apeldoorn	Луковица	11,17 ± 0,18	21,12 ± 0,09	23,83 ± 1,71	16,99 ± 0,27	20,32 ± 0,33
	Побег	4,01 ± 0,23	8,43 ± 0,32	11,02 ± 0,79	10,02 ± 0,34	11,07 ± 0,61
	Цветок	0,10 ± 0,02	0,85 ± 0,10	1,7 ± 0,31	2,02 ± 0,11	2,02 ± 0,06
Hatsuzakura	Луковица	12,03 ± 0,14	20,02 ± 0,07	24,81 ± 2,01	17,32 ± 0,31	22,02 ± 0,52
	Побег	3,52 ± 0,30	9,03 ± 0,25	12,13 ± 0,85	9,48 ± 0,22	11,12 ± 0,81
	Цветок	0,11 ± 0,03	0,87 ± 0,13	1,3 ± 0,44	1,71 ± 0,14	1,88 ± 0,05
Dynasty	Луковица	8,79 ± 0,41	30,19 ± 4,18	23,70 ± 1,20	23,26 ± 0,20	51,70 ± 1,53
	Побег	4,95 ± 0,40	22,66 ± 0,45	10,34 ± 0,51	16,59 ± 0,31	17,59 ± 0,19
	Цветок	0,26 ± 0,03	4,99 ± 0,64	2,97 ± 0,06	3,58 ± 0,33	4,12 ± 0,18
Leen van der Mark	Луковица	11,15 ± 0,91	13,87 ± 0,22	24,38 ± 2,22	22,66 ± 0,45	35,54 ± 0,040
	Побег	3,09 ± 0,16	6,78 ± 0,51	15,19 ± 0,57	13,87 ± 1,29	15,40 ± 1,40
	Цветок	0,19 ± 0,01	1,18 ± 0,06	3,25 ± 0,15	2,64 ± 0,01	3,79 ± 0,24
Leo Visser	Луковица	12,05 ± 0,79	14,02 ± 0,32	23,23 ± 1,98	23,14 ± 0,36	35,54 ± 0,040
	Побег	2,98 ± 0,11	7,12 ± 0,45	14,99 ± 0,43	14,08 ± 1,31	15,40 ± 1,40
	Цветок	0,15 ± 0,01	1,23 ± 0,04	3,41 ± 0,17	3,01 ± 0,02	4,05 ± 0,31
Fringed Golden Apeldoorn	Луковица	8,79 ± 0,06	16,37 ± 1,08	25,48 ± 1,37	19,38 ± 0,49	30,96 ± 0,92
	Побег	5,62 ± 0,13	6,39 ± 0,14	11,38 ± 0,87	12,96 ± 0,20	17,96 ± 0,80
	Цветок	0,26 ± 0,02	1,36 ± 0,13	1,94 ± 0,11	3,39 ± 0,33	4,23 ± 0,28
Cummins	Луковица	9,01 ± 0,08	17,03 ± 1,18	26,04 ± 1,51	20,11 ± 0,91	31,16 ± 1,12
	Побег	6,16 ± 0,15	6,85 ± 0,21	12,38 ± 0,93	13,06 ± 0,32	18,48 ± 0,93
	Цветок	0,31 ± 0,04	1,66 ± 0,17	2,01 ± 0,13	4,21 ± 0,47	4,77 ± 0,37
Purissima	Луковица	13,17 ± 0,23	23,42 ± 0,11	25,81 ± 1,25	18,09 ± 0,39	21,33 ± 0,33
	Побег	5,11 ± 0,15	9,93 ± 0,52	12,42 ± 0,99	11,72 ± 0,64	12,27 ± 0,81
	Цветок	0,15 ± 0,05	1,05 ± 0,13	2,7 ± 0,51	2,82 ± 0,21	2,62 ± 0,08
Ognik	Луковица	14,03 ± 0,24	22,12 ± 0,10	25,23 ± 2,11	18,11 ± 0,42	23,14 ± 0,62
	Побег	4,51 ± 0,42	10,33 ± 0,23	13,18 ± 0,95	10,18 ± 0,27	12,17 ± 0,93
	Цветок	0,17 ± 0,05	1,07 ± 0,16	1,7 ± 0,48	1,91 ± 0,18	2,04 ± 0,08

Примечание. * – среднее/стандартная ошибка (среднего).

Таблица 2

Экзогенные и эндогенные брассиностероиды в вегетативных и генеративных органах луковичных культур рода *Hyacinthus*

Table 2

Exogenous and endogenous brassinosteroids in the vegetative and generative organs of bulbous crops of the genus *Hyacinthus*

Название сорта	Органы растения	Среднее количество брассиностероидов, мг*				
		Контроль*	24-эпибрассинолид		28-гомобрассинолид	
			10 ⁻⁷	10 ⁻⁹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁹
Anna Lisa	Луковица	11,37 ± 0,12	16,59±0,31	23,70 ± 1,20	31,24 ± 1,24	47,76 ± 0,28
	Побег	4,52 ± 0,04	7,48 ± 0,24	13,87 ± 1,29	17,59 ± 0,19	31,83 ± 0,80
	Цветок	0,54 ± 0,01	1,61 ± 0,07	2,12 ± 0,07	4,13 ± 0,18	11,25 ± 0,05
Perle Brilliante	Луковица	9,68 ± 0,32	60,67 ± 1,65	50,55 ± 1,54	47,76 ± 0,28	57,31 ± 0,67
	Побег	3,81 ± 0,39	41,67 ± 1,05	33,42 ± 0,70	22,97 ± 0,45	32,84 ± 1,40
	Цветок	0,34 ± 0,02	22,34 ± 0,86	12,15 ± 0,91	12,96 ± 0,20	13,65 ± 0,22
Grand Maitre	Луковица	14,03 ± 0,18	52,63 ± 2,52	42,85 ± 1,18	55,49 ± 1,44	64,26 ± 2,36
	Побег	5,83 ± 0,43	16,24 ± 0,01	14,69 ± 0,23	19,95 ± 0,14	22,66 ± 0,45
	Цветок	0,86 ± 0,01	5,48 ± 0,13	3,25 ± 0,07	4,13 ± 0,18	6,47 ± 0,10
Blue Eyes	Луковица	9,12 ± 0,18	69,82 ± 1,36	60,66 ± 0,86	60,67 ± 1,65	64,79 ± 0,18
	Побег	3,09 ± 0,16	57,31 ± 0,67	39,38 ± 0,49	31,66 ± 0,42	48,13 ± 0,18
	Цветок	0,29 ± 0,04	30,96 ± 0,92	26,38 ± 1,12	22,97 ± 0,96	24,06 ± 0,23
La Victoire	Луковица	10,17 ± 0,10	15,22 ± 0,21	22,90 ± 1,00	29,74 ± 1,18	45,16 ± 0,18
	Побег	3,52 ± 0,02	6,48 ± 0,15	12,17 ± 1,09	16,09 ± 0,17	30,13 ± 0,60
	Цветок	0,37 ± 0,01	2,81 ± 0,09	1,92 ± 0,04	3,13 ± 0,13	9,75 ± 0,02
Doctor Krueger	Луковица	7, 86 ± 0, 23	13,67 ± 1,32	23,02 ± 0,90	29,44 ± 1,04	43,21 ± 0,11
	Побег	2,93 ± 0,30	6,48 ± 0,15	11,97 ± 1,05	15,89 ± 0,11	28,93 ± 0,36
	Цветок	0,25 ± 0,01	2,81 ± 0,09	1,74 ± 0,03	2,98 ± 0,11	7,82 ± 0,01

Примечание. * – среднее/стандартная ошибка (среднего).

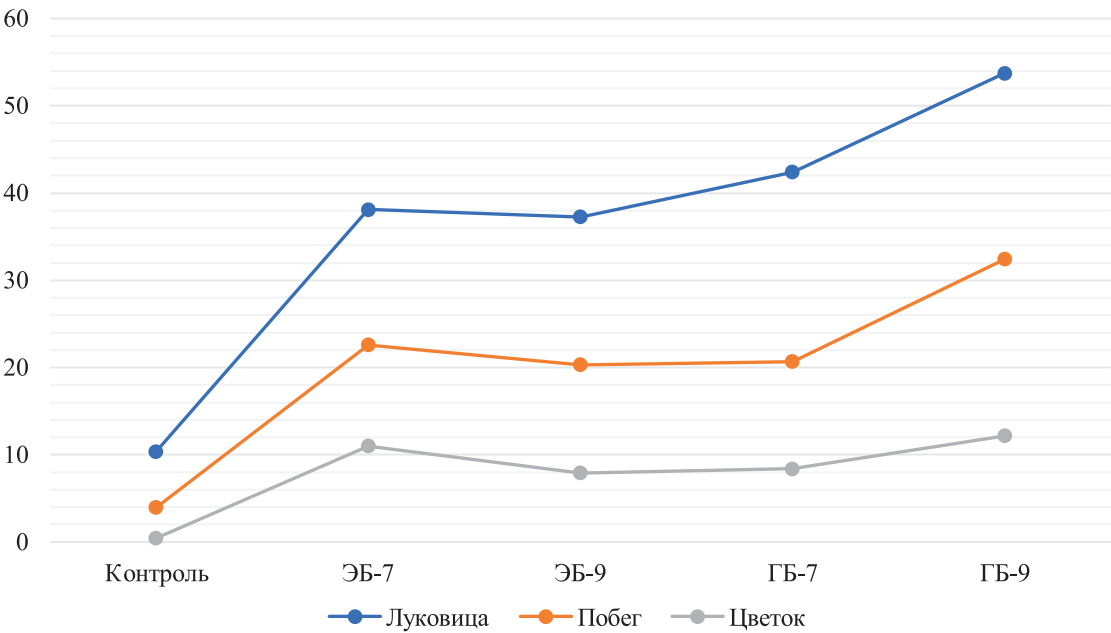


Рис. 2. Содержания брассиностероидов в органах растений рода *Hyacinthus*, мг

Fig. 2. Brassinosteroid content in organs of *Hyacinthus* plants, mg

Исследование эндогенного содержания БС в вегетативных и генеративных органах луковичных растений показало, что количество всех анализируемых групп стероидных гормонов в луковицах ($10,37 \pm 0,19$) в 10 раз превышало их содержание в цветах ($0,44 \pm 0,016$), в побегах ($3,95 \pm 0,22$) в 3 раза их содержания в цветках. В органах всех сортов тюльпанов, обработанных растворами в концентрации ЭБ10⁻⁷, ЭБ10⁻⁹, ГБ10⁻⁷ и ГБ10⁻⁹, количество всех анализируемых групп стероидных гормонов в луковицах ($36,40 \pm 1,18$) в 4,5 раза превышало их содержание в цветах ($8,00 \pm 0,29$), в побегах ($4,5 \pm 0,62$) в 2,5 раза их содержания в цветках.

При этом наилучшие результаты по накоплению brassinosteroidов были получены при обработке луковиц ЭБ10⁻⁷ ($42,39 \pm 1,14$) и ГБ 10⁻⁹ ($53,75 \pm 0,63$), что в 4 и 5 раз превышает контрольные измерения соответственно (рис. 2).

Анализируя внешний вид растений и профиль БС, мы обнаружили, что в культуре гиацинтов их больше, чем в тюльпанах. Сорт «Blue Eyes» наряду с интенсивным развитием характеризовался высоким содержанием практических всех групп БС, особенно эпибрасиностероидов.

Заключение

Эндогенное содержания БС в вегетативных и генеративных органах луковичных растений показало, что количество гормонов в луковицах в 62 и 10 раз превышает их содержание в цветах, в побегах в 24 и 3 раза их содержания в цветках тюльпанов и гиацинтов соответственно. Наилучшие результаты по накоплению brassinosteroidов у тюльпанов были получены при обработке луковиц ЭБ 10⁻⁹ ($24,69 \pm 1,76$) и ГБ 10⁻⁹ ($29,31 \pm 0,57$), что в 2 раза превышает контрольные измерения, а у гиацинтов при доработке луковиц ГБ10⁻⁷ ($42,39 \pm 1,14$) и ГБ 10⁻⁹ ($53,75 \pm 0,63$), что в 4 и 5 раз превышает контрольные измерения соответственно.

Библиографические ссылки

1. Dauben WG, Brookhart TJ. Stereocontrolled Synthesis of Steroidal Side Chains. *Journal of the American Chemical Society*. 1981;103(5):237–238.
2. Guo C, Fuchs PL. The first synthesis of the aglycone of the potent anti-tumor steroidal saponin OSW-1. *Tetrahedron Lett*. 1998;39(10):1099–1102.
3. Mikami K, Kishin H, Loh T. Unified approach to (22S)- or (22R)-hydroxy steroid side chain: Lewis acid-promoted carbonyl-ene reaction with α -alkoxyaldehydes. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*. 1994(4):495–496.
4. Думнова АА, Вахромеева АА. Влияния различных субстратов на зимнюю выгонку растений рода *Lilium* при использовании фитостимуляторов. В: Грачева ЕП, редактор. *Труды Международной научной конференции. Проблемы экологического образования в XXI веке*. Москва: [и. н.]; 2017. с. 7–10.
5. Пугачева ГМ, Соколова МА, Ячменева СЮ, Юдина ОВ. Эффективность регуляторов роста при выращивании цветочных культур. *Достижения науки и техники АПК*. 2010;8:36–37. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-regulyatorov-rosta-pri-vyraschivanii-tsvetochnyh-kultur>.
6. Хугаева АА. Обоснование возможности применения ростостимуляторов для выращивания рассады цветочных культур. В: *Материалы XV Международной научно-практической конференции молодых ученых. Инновационные тенденции развития российской науки*. Красноярск: [и. н.]; 2022. с. 123–125.
7. Левая МА, Влияние биологически активных веществ на устойчивость тюльпанов классов Кауфмана и Грейга к вирусу пестролепестности. *Весті БДПУ. Серія, 3. Фізика. Математика. Інформатика. Біологія. Географія*. 2008;1:38–42.
8. Плешаков ДН, Смолин НВ, Потапова НВ, Волгин ВВ, Потапов ИВ. К вопросу оценки декоративных качеств срезочных сортов чайно-гибридной розы при выращивании на гидропонике. *Аграрный научный журнал*. 2023;5:33–40. <http://10.28983/asj.y2023i5>.
9. Старостенкова ЕМ. Технология производства посадочного материала гиацинта восточного (*Hyacinthus orientalis hybridum hort.*) с использованием регуляторов роста и развития растений. В: *Материалы межвузовской научно-технической конференции студентов и курсантов на базе Калининградского государственного технического университета*, Калининград, 2–15 апреля 2018 г. Калининград: КГТУ; 2018. с. 181–184.
10. Рыженкова ЮИ. История и результаты интродукции представителей рода *Tulipa* L. в Беларусь. В: *Современные направления деятельности ботанических садов и держателей ботанических коллекций по сохранению биологического разнообразия растительного мира. Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н. В. Смольского*, Минск, 27–29 сентября 2005 г. Минск: Эдит ВВ; 2005. с. 142–145.

References

1. Dauben WG, Brookhart TJ. Stereocontrolled Synthesis of Steroidal Side Chains. *Journal of the American Chemical Society*. 1981;103(5):237–238.
2. Guo C, Fuchs PL. The first synthesis of the aglycone of the potent anti-tumor steroidal saponin OSW-1. *Tetrahedron Lett*. 1998;39(10):1099–1102.
3. Mikami K, Kishin H, Loh T. Unified approach to (22S)- or (22R)-hydroxy steroid side chain: Lewis acid-promoted carbonyl-ene reaction with α -alkoxyaldehydes. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*. 1994(4):495–496.
4. Dumnova AA, Vakhromeeva AA. *Vlianiya razlichnykh substratov na zimnyuyu vygonku rastenii roda Lilium pri ispol'zovanii fitostimulyatorov* [Influence of various substrates on winter forcing of plants of the genus *Lilium* with the use of phyto-stimulators]. In:

Gracheva EP, editor. Proceedings of the International Scientific Conference «Problems of Ecological Education in the 21st Century». Moscow: [publisher unknown]; 2017. p. 7–10. Russian.

5. Pugacheva GM, Sokolova MA, Yachmeneva SYu & Yudina OV. *Effektivnost regulyatorov rosta pri vyrashchivanii tsvetochnykh kultur* [Effectiveness of growth regulators in the cultivation of flower crops]. *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*. 2010;8:36–37. <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-regulyatorov-rosta-pri-vyrashchivanii-tsvetochnyh-kultur>. Russian.

6. Khugaeva AA. *Obosnovanie vozmozhnosti primeneniya rostostimulyatorov dlya vyrashchivaniya rassady tsvetochnykh kultur* [Justification of the possibility of using growth stimulants for growing flower seedlings]. In: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference of Young Scientists. Innovative Trends in the Development of Russian Science». Krasnoyarsk: [publisher unknown]; 2022. p. 123–125. Russian.

7. Levaya MA. *Vliyanie biologicheski aktivnykh veshchestv na ustoychivost' tyul'panov klassov Kaufmana i Greiga k virusu pestroleptestnosti* [Influence of biologically active substances on the resistance of Kaufmann and Greig tulips to the tulip mosaic virus]. *Vesci BDPU. Series 3: Physics. Mathematics. Informatics. Biology. Geography*. 2008;1:38–42. Russian.

8. Pleshakov DN, Smolin NV, Potapova NV, Volgin VV & Potapov IV. *K voprosu otsenki dekorativnykh kachestv srezochnykh sortov chaino-gibridnoy rozy pri vyrashchivanii na gidroponike* [On the issue of assessing the decorative qualities of cut hybrid tea rose cultivars grown in hydroponics]. *Agrarian Scientific Journal*. 2023;5:33–40. <http://10.28983/asj.y2023i5>. Russian.

9. Starostenkova EM. *Tekhnologiya proizvodstva posadochnogo materiala giatsinta vostochnogo (Hyacinthus orientalis hybridum hort.) s ispol'zovaniem regulyatorov rosta i razvitiya rastenii* [Technology of production of planting material of oriental hyacinth (Hyacinthus orientalis hybridum hort.) using plant growth and development regulators]. In: Proceedings of the Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students and Cadets, Kaliningrad State Technical University, 2018 April 2–15. Kaliningrad: KSTU; 2018. p. 181–184. Russian.

10. Ryzhenkova YuI. *Istoriya i rezul'taty introduksii predstavitelei roda Tulipa L. v Belarusi* [History and results of introduction of Tulipa L. representatives in Belarus]. In: Modern directions of activity of botanical gardens and holders of botanical collections in the conservation of biodiversity of the plant world. Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician N. V. Smolsky, Minsk, 2005 September 27–29. Minsk: Edit VV; 2005. p. 142–145. Russian.

Статья поступила в редколлегию 25.08.2025.

Received by editorial board 25.08.2025.

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 630*182.4(630*176.322.6):539.163(546.36+546.42)

КРАТКОСРОЧНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ^{137}Cs И ^{90}Sr ЭЛЕМЕНТОВ БИОГЕОЦЕНОЗОВ ВЫСОКОВОЗРАСТНЫХ ДУБРОВ В ЗОНЕ ЭВАКУАЦИИ (ОТЧУЖДЕНИЯ) ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Д. К. ГАРБАРУК¹⁾, А. Н. ВОРОНЕЦКАЯ¹⁾, С. В. ШУМАК¹⁾, Л. М. ТУРЧИН¹⁾, А. В. УГЛЯНЕЦ¹⁾

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

Образец цитирования:

Гарбарук ДК, Воронцовская АН, Шумак СВ, Турчин ЛМ, Углынец АВ. Краткосрочные изменения загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr элементов биогеоценозов высоковозрастных дубрав в зоне эвакуации (отчуждения) Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;3:51–66.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-51-66>

For citation:

Garbaruk DK, Voronetskaya AN, Shumak SV, Turchin LM, Uglyanets AV. Short-term contamination changes of ^{137}Cs and ^{90}Sr in ecosystems elements of high-age oak forests in the Chernobyl nuclear power plant exclusion zone. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;3:51–66. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-51-66>

Авторы:

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

Authors:

Dmitriy K. Garbaruk, head of the department of ecology of vegetative complexes.
dima.garbaruk.77@mail.ru
Alesya N. Voronetskaya, junior researcher at the department of ecology of vegetative complexes.
voronetskaya2015@mail.ru
Svetlana V. Shumak, postgraduate student; junior researcher at the department of ecology of vegetative complexes.
shumaksvetlana@mail.ru
Larisa M. Turchin, researcher at the department of ecology of vegetative complexes.
lara.turchin@bk.ru
Anatoliy V. Uglyanets, PhD (agriculture), docent; leading researcher at the department of ecology of vegetative complexes.
uhlianets@mail.ru

Исследованиями в дубравах кисличной, снытевой и прируслово-пойменной в зоне эвакуации (отчуждения) Чернобыльской атомной электростанции установлено, что на современном этапе последствий радиационной аварии на общем фоне смягчения радиационной обстановки наблюдаются существенные различия в направлениях и темпах краткосрочных изменений (2018–2024 гг.) показателей загрязнения почв и структурных компонентов основных ярусов насаждений ^{137}Cs и ^{90}Sr . Ambient мощности дозы гамма-излучения и загрязнение почвы обоими радионуклидами снизился во всех типах дубрав, за исключением дубравы прируслово-пойменной, в почвах которой увеличилось содержание ^{90}Sr . Текущие изменения параметров загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr органов и тканей деревьев дуба, растений подроста и подлеска, частей фитомассы фоновых видов живого напочвенного покрова были разновекторными и разновеликими и зависели от вида растения, типа леса, года наблюдения. Ранжированные ряды коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в компоненты деревьев дуба и органы подроста и подлеска различались по типам леса и годам наблюдений. Для деревьев дуба минимальным был переход ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесину, максимальным – переход ^{137}Cs в желуди и листья. В 2024 г. ранжированный ряд коэффициентов перехода ^{137}Cs был общим для всех типов леса – «древесина < кора < корни < ветви < желуди < листья». Наиболее частым распределением органов подроста и подлеска по величинам коэффициентов перехода в них ^{137}Cs был ряд «стволики < корни < листья», ^{90}Sr – «стволики < листья < корни». Выявлено повышение удельной активности ^{90}Sr в надземной и подземной фитомассе ландыша майского в ряду типов леса «дубрава прируслово-пойменная < дубрава кисличная < дубрава снытевая».

Ключевые слова: Чернобыльская атомная электростанция; зона отчуждения; дубрава; почва; элемент фитоценоза; ^{137}Cs и ^{90}Sr ; удельная активность; коэффициент перехода.

SHORT-TERM CONTAMINATION CHANGES OF ^{137}Cs AND ^{90}Sr IN ECOSYSTEMS ELEMENTS OF HIGH-AGE OAK FORESTS IN THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT EXCLUSION ZONE

D. K. GARBARUK^a, A. N. VORONETSKAYA^a, S. V. SHUMAK^a, L. M. TURCHIN^a, A. V. UGLYANETS^a

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

Studies in wood sorrel, goutweed and riverbed–floodplain oak forests in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant, it was established that at the current stage of the consequences of the radiation disaster against the general background of mitigation of the radiation situation, there are significant differences in the directions and rates of short-term changes (2018–2024) in the indicators of contamination of soils and structural components of ^{137}Cs and ^{90}Sr of the main tiers of plantations. The ambient dose rate of gamma radiation and soil contamination with both radionuclides decreased in all types of oak forests, except for the soil of the riverbed–floodplain oak forest, where the ^{90}Sr content increased. Current changes in the parameters of ^{137}Cs and ^{90}Sr contamination of oak tree organs and tissues, undergrowth and understorey plants, parts of phytomass of background species of living ground cover were of different vectors and magnitudes and depended on the plant species, forest type and year of observation. The ranked series of ^{137}Cs and ^{90}Sr transition coefficients into components of oak trees and organs of undergrowth and understorey differed by forest types and years of observation. For oak trees, the transfer of ^{137}Cs and ^{90}Sr to wood was minimal, while the transfer of ^{137}Cs to acorns and leaves was maximal. In 2024, the ranked series of ^{137}Cs transition coefficients was common for all forest types – «wood < bark < roots < branches < acorns < leaves». The most frequent distribution of undergrowth and understorey organs according to the values of ^{137}Cs transition coefficients in them was the series «trunks < roots < leaves», ^{90}Sr – «trunks < leaves < roots». An increase in the specific activity of ^{90}Sr in the aboveground and underground phytomass of May lily was revealed in the series of forest types «riverbed–floodplain oak forest < wood sorrel oak forest < goutweed oak forest».

Keywords: Chernobyl Nuclear Power Plant; exclusion zone; oak forest; soil; elements of phytocenosis; ^{137}Cs and ^{90}Sr ; specific activity; transition coefficient.

Введение

Леса наиболее надежно блокируют миграцию радиоактивных веществ и являются барьером для их пространственного перемещения [1–4]. Поэтому в лесных экосистемах с высокими уровнями радиоактивного загрязнения необходимо постоянное слежение за радиационной обстановкой в целях перманентной ее оценки и разработки прогнозов по динамике содержания радионуклидов [5]. Система радиационно-экологического мониторинга в лесных биогеоценозах на различных этапах последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) обоснована в работе [6]. Его осуществление в лесах зоны отчуждения (ЗО) ЧАЭС, самых загрязненных радиоактивными веществами в Беларуси¹ входит в число

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

приоритетных задач функционирующего в ее границах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (заповедник).

Мониторинговые радиологические исследования древостоев основных лесобразующих пород в ЗО были начаты на следующий год после аварии на ЧАЭС и осуществлялись до 2006 г. [3]. С 2006 г. сотрудники заповедника начали формировать сеть системно-факторного радиационно-экологического мониторинга лесных биогеоценозов на основе типов лесорастительных условий (ТЛУ) [7], которая в силу обстоятельств не была завершена [8]. Однако оба эти направления не включали оценку загрязнения радионуклидами насаждений дубовой лесной формации.

Современный радиационно-экологический мониторинг лесных экосистем в ЗО ЧАЭС на формационно-типологической основе, предусматривающий закладку постоянных пунктов наблюдения (ППН) в трех ключевых типах леса каждой их основных лесных формаций (сосновой, березовой, черноольховой и дубовой) с периодичностью наблюдений 5 лет, осуществляется научным персоналом заповедника с 2014 г. [8]. В 2018 г. было заложено по одному ППН в дубравах кисличной, снытевой и прируслово-пойменной, занимающих соответственно 28,8, 10,8 и 10,8 % от площади формации. Исходные сведения о содержании основных дозообразующих радионуклидов (^{137}Cs и ^{90}Sr) в элементах дубрав приведены в работах [9; 10]. Повторный съем данных в них был выполнен в 2024 г. Полученные материалы являются основой для оценки текущей радиационной ситуации в насаждениях дуба.

Цель работы: определить параметры текущих краткосрочных изменений загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr структурных компонентов основных элементов биогеоценозов в дубравах ЗО ЧАЭС.

Материалы, методы и объекты исследования

Предмет исследований – текущее изменение радиационной обстановки и уровней загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr структурных компонентов деревьев дуба (древесина, кора, корни, ветви, листья, желуди), органов преобладающих пород подроста и подлеска (стволики, корни, листья), надземной и подземной фитомассы фоновых видов живого напочвенного покрова (ЖНП) на ППН в дубравах кисличной, снытевой и прируслово-пойменной. Эти типы леса суммарно занимают 50,4 % площади дубовой лесной формации ЗО ЧАЭС.

Закладку ППН выполнили в соответствии с ТКП 240-2010 (02080)² и ТКП 498-2013 (02080)³, таксацию древостоев и определение таксационных показателей – в соответствии с методами, описанными в источниках [11; 12] с использованием справочника [13]. Таксационная характеристика древостоев дуба на оба срока наблюдений дана в табл. 1. Увеличение густоты древостоя в дубраве прируслово-пойменной обусловлено выходом некоторого количества растений березы из подроста в древесный ярус [14].

Таблица 1

Изменение таксационных показателей древостоев дуба

Table 1

Changes in taxation indices of oak stands

Дубрава	Год наблюдения	Состав древостоя	Возраст дуба, лет	Средние		Бонитет	Густота, шт./га	Сумма площадей сечений, м ² /га	Полнота	Запас, м ³ /га
				Н, м	Д, см					
Кисличная	2018	7Д2Олч1Г+Б,Кл	110	24,3	58,9	II	600	25,6	0,8	258
	2024	7Д2Олч1Г+Б,Кл	116	26,1	58,7	II	592	23,3	0,7	225
Снытевая	2018	6Д3Г1Кл+Олч	112	23,3	50,9	III	540	27,6	0,9	252
	2024	6Д3Г1Кл+Олч	118	23,6	51,8	III	484	25,6	0,8	231
Прируслово-пойменная	2018	9Д1Тч+Б,Олч,Гш	77	13,9	34,7	IV	324	20,2	0,8	156
	2024	9Д1Б+Олч,Тч,Гш	83	13,7	32,0	V	336	18,1	0,7	139

Радиологические исследования на ППН. Замер амбиента мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МД) выполняли дозиметром-радиометром МКС-АТ6130 (Беларусь) на высоте 1 м от поверхности почвы в 9 контрольных точках. На них же отбирали образцы верхних слоев почвы с лесной подстилкой

²ТКП 240-2010 (02080). Радиационный контроль. Обследование земель лесного фонда. Порядок проведения. Утвержден и введен постановлением Министерства лесного хозяйства Респ. Беларусь от 22 февраля 2010 г. № 5. Минск: Минлесхоз, 2010. 18 с.

³ТКП 498-2013 (02080). Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения. Утвержден и введен Постановлением Министерства лесного хозяйства Респ. Беларусь от 3 октября 2013 г. № 12. Минск: Минлесхоз, 2013. 28 с.

и ЖНП на общую глубину 20 см стандартным пробоотборником диаметром 4 см в соответствии с ТКП 499-2013 (02080)⁴. Пробы древесины дуба отбирали с помощью возрастного бурава Мога (Швеция), пробы коры – цилиндрическим пробоотборником диаметром 40 мм на высоте 1,3 м у 20–30 растущих деревьев дуба I–III классов роста и развития (по Крафту). Отбор образцов скелетных боковых корней выполняли путем раскопок их лопатой на расстоянии до 1,5 м от стволов деревьев, тонких (1–3-летних) ветвей, листьев и желудей – при помощи сучкореза штангового. Для получения проб наиболее распространенных видов подроста и подлеска полностью выкапывали необходимое количество средних растений каждого вида с последующим разделением их на фракции: стволики с корой, листья и корни (скелетные и обрастающие). Надземную фитомассу фоновых видов ЖНП получали путем их срезания секаторами на уровне поверхности почвы, подземную – методом раскопок. Биологические образцы отбирались равномерно по всему ППН, или в местах их произрастания.

Подготовку образцов для анализа осуществляли в соответствии с ТКП 251-2010 (02080)⁵. Биологические образцы измельчали секаторами и мельницей ножевой РМ-120 (Россия) до порошкообразной массы.

Определение удельной активности (A_y) ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах почвы и биологических образцах растений, высушенных до воздушно-сухого состояния, выполнено в лаборатории спектрометрии и радиохимии заповедника инструментально на гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315 (Беларусь).

Плотность загрязнения почвы (ПЗ) ^{137}Cs и ^{90}Sr рассчитывали в соответствии с ТКП 240-2010 (02080)². Для сопоставления уровней накопления радионуклидов в компонентах фитоценозов при различной ПЗ рассчитывали коэффициенты перехода (K_n) радионуклидов из почвы в растения, как частное от их A_y (Бк/кг) к ПЗ (кБк/м²).

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

Результаты исследования и их обсуждение

Мощность дозы и загрязнение почв. На современном этапе последствий аварии на ЧАЭС активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных экосистемах ЗО ЧАЭС за счет естественного распада уменьшилась более чем наполовину от выпавшего в 1986 г. их количества. В исследованных дубравах МД на высоте 1 м в 2018 г. составляла 0,21–0,67 мкЗв/ч, в 2024 г. – 0,17–0,54 мкЗв/ч, A_y ^{137}Cs в почве – 1294–3408 и 1172–2198 Бк/кг, ПЗ ^{137}Cs – 246–649 и 233–534 кБк/м², A_y ^{90}Sr в почве – 108–886 и 140–352 Бк/кг, ПЗ ^{90}Sr – 20,5–168,7 и 27,8–85,6 кБк/м² (табл. 2). Различия в загрязнении почв обусловлены мозаичностью выпадения радионуклидов, влажностью почв, природой самих радионуклидов [2; 3; 15; 16]. За 6 лет произошло выравнивание A_y ^{137}Cs в почвах дубрав кисличной и прируслово-пойменной.

Таблица 2

Показатели радиационной обстановки в дубравах

Table 2

Indicators of radiation situation in oak forests

Дубрава		Прируслово-пойменная		Кисличная		Снытевая	
Год		2018	2024	2018	2024	2018	2024
МД на высоте 1 м, мкЗв/ч		0,21	0,17	0,34	0,32	0,67	0,54
A_y , Бк/кг	^{137}Cs	1294 ± 259	1172 ± 234	2137 ± 427	1173 ± 311	3408 ± 682	2198 ± 582
	^{90}Sr	108 ± 48	140 ± 46	289 ± 69	225 ± 66	886 ± 190	352 ± 107
ПЗ, кБк/м ²	^{137}Cs	245,7	233,1	458,3	291,9	648,8	534,5
	^{90}Sr	20,5	27,8	62,0	56,0	168,7	85,6
A_y $^{137}\text{Cs}/A_y$ ^{90}Sr		12,0	8,4	7,4	5,2	3,8	6,2

Примечание. Здесь и далее в таблицах «±» обозначает погрешность лабораторных измерений.

Показатели МД и загрязнения почв ^{137}Cs и ^{90}Sr в оба срока наблюдений повышались в типологическом ряду «дубрава прируслово-пойменная – дубрава кисличная – дубрава снытевая» фактически по градиентам возрастания индексов влажности и трофности эдафотопов ($A_2B_2 – D_2 – D_3$). Полагаем, что приведенное

⁴ТКП 499-2013 (02080). Радиационный мониторинг лесного фонда. Обследование постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения. Утвержден и введен постановлением Министерства лесного хозяйства Респ. Беларусь от 3 октября 2013 г. № 12. Минск: Минлесхоз, 2013. 28 с.

⁵ТКП 251-2010 (02080). Радиационный контроль. Отбор и подготовка проб лесной продукции. Порядок проведения. Утвержден и введен постановлением Министерства лесного хозяйства Респ. Беларусь от 28 июня 2010 г. № 14. Минск: Минлесхоз, 2010. 26 с.

распределение является случайным, так как фактически загрязнение дубовых лесов изначально определено мозаичностью выпадения радионуклидов [17].

Отношение $A_y^{137}\text{Cs}/A_y^{90}\text{Sr}$ в почве в 2018 г. увеличивалось в ряду дубрава снытевая < дубрава кисличная < дубрава прируслово-пойменная с 3,8 до 12 раз. К 2024 г. этот диапазон сузился до 5,2–8,4 раза. При этом в дубраве прируслово-пойменной отношение $A_y^{137}\text{Cs}/A_y^{90}\text{Sr}$ снизилось в 1,4, в кисличной – в 1,3, а в снытевой – выросло в 1,6 раза (табл. 2). Приведенные данные указывают на отличие динамики текущего содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах разных типов леса.

За анализируемый период уменьшение МД по типам леса составило от 5,9 до 19,4 % при скорости ее снижения в отдельных насаждениях 1,0 и 3,2 %/год (табл. 3). Это выходит за пределы среднегодовых темпов падения данного показателя в сосняках ЗО ЧАЭС в 1996–2016 гг. (2,8–3,0 %/год) [18] и в среднем близко к скорости снижения МД в лесах дальнего следа радиоактивных выпадений через 30 лет после аварии на ЧАЭС (2,2 %/год)⁶.

Таблица 3

Текущие изменения показателей радиационной обстановки в дубравах
(числитель – абсолютное, знаменатель – относительное, %)

Table 3

Current changes of radiation situation indicators in oak forests (numerator – absolute, denominator – relative, %)

Дубрава		Прируслово-пойменная		Кисличная		Снытевая	
Изменения за		период	год	период	год	период	год
МД, мкЗв/ч		–0,04 / –19,0	–0,01 / –3,2	–0,13 / –19,4	–0,02 / –3,2	–0,02 / –5,9	–0,003 / –1,0
A_y , Бк/кг	^{137}Cs	–122,0 / –9,4	–20,3 / –1,6	–1210,0 / –35,5	–201,7 / –5,9	–964,0 / –45,1	–160,7 / –7,5
	^{90}Sr	+32,0 / +29,6	+5,3 / +4,9	–534,0 / –60,3	–89,0 / –10,0	–64,0 / –22,1	–10,7 / –3,7
ПЗ, кБк/м ²	^{137}Cs	–12,6 / –5,1	–2,1 / –0,9	–114,3 / –17,6	–19,1 / –2,9	–166,4 / –36,3	–27,7 / –6,1
	^{90}Sr	+7,3 / +35,6	+1,2 / +5,9	–83,1 / –49,3	–13,9 / –8,2	–6,0 / –9,7	–1,0 / –1,6

Уменьшение $A_y^{137}\text{Cs}$ в почве происходило со скоростью 1,6–7,5 %/год, ПЗ ^{137}Cs – 0,9–6,1 %/год. Суммарное снижение значений этих показателей за 6 лет оказалось очень высоким и составило соответственно 9,4–45,1 и 5,1–36,3 %.

Содержание ^{90}Sr в почве и ПЗ ^{90}Sr в суходольных дубравах за 6 лет уменьшились. Более быстрые темпы их падения в дубраве кисличной в сравнении с дубравой снытевой означают, что скорость очищения верхних 20-сантиметровых слоев почв от данного радионуклида возрастает с понижением индекса влажности эдафотопов. Это противоречит установленному ранее факту, что в дубравах с приближением уровней грунтовых вод к дневной поверхности содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в верхних слоях почв снижается [19].

Выявленный рост $A_y^{90}\text{Sr}$ в почве и ПЗ ^{90}Sr в дубраве прируслово-пойменной, с одной стороны, довольно существенный (табл. 3), с другой – разница между значениями $A_y^{90}\text{Sr}$ в 2018 и 2024 гг. находится в пределах погрешностей измерения (табл. 2). Повышение содержания радионуклидов в 20-сантиметровых слоях лесных почв в отдельные годы явление ординарное. Так, всплески увеличения содержания ^{137}Cs в почвах сосняков обусловлены его вертикальной миграцией и перераспределением между компонентами почвенно-подстилочного комплекса [20]. Этот процесс волнообразный и связан с циклическим взаимообменом ^{137}Cs в системе «подстилка ↔ почва» под влиянием погодных-климатических условий, определяющих сезонное изменение влажности данных компонентов [21].

Полагаем, что в числе возможных причин увеличения показателей загрязнения 20-сантиметровых слоев почвы ^{90}Sr в дубраве прируслово-пойменной в 2024 г. стало затопление и подтопление пониженных участков насаждений высокими паводковыми водами весной 2023 г., обеспечившие в условиях многолетнего отсутствия весенних затоплений, подъем радионуклида в верхние слои почв и способствовавшие повышению его концентрации в почвенно-подстилочном комплексе.

Содержание радионуклидов в элементах фитоценозов. В древостое величины концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr различаются по структурным компонентам деревьев, типам леса и годам наблюдения (табл. 4). Это обусловлено спецификой поглощения и последующего перераспределения ^{137}Cs или ^{90}Sr конкретными органами и тканями деревьев под влиянием погодных-климатических, почвенно-грунтовых и иных экологических факторов, уровнями загрязнения почв этими радионуклидами и расстоянием до ЧАЭС [1–4; 15–17; 22–24].

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

Таблица 4

Показатели удельной активности ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в компонентах деревьев дуба, Бк/кг

Table 4

Specific activity values of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in oak tree components, Bq/kg

Дубрава		Прируслово-пойменная		Кисличная		Снытевая	
Год		2018	2024	2018	2024	2018	2024
A _y ¹³⁷ Cs	кора	1067 ± 220	1062 ± 217	13721 ± 307	1014 ± 272	2398 ± 480	1723 ± 457
	древесина	586 ± 127	720 ± 156	796 ± 199	508 ± 166	1038 ± 257	883 ± 245
	ветки	1676 ± 335	1272 ± 254	3915 ± 783	1488 ± 397	10194 ± 2039	4603 ± 1218
	листья	3788 ± 758	5895 ± 1179	17570 ± 3514	8279 ± 219	42466 ± 8493	16233 ± 4292
	корни	2066 ± 413	1168 ± 234	5024 ± 1005	3824 ± 1014	6043 ± 1209	5490 ± 1453
	желуди	–	4032 ± 807	–	10389 ± 2751	–	14076 ± 3723
A _y ⁹⁰ Sr	кора	2927 ± 585	2279 ± 456	1196 ± 262	885 ± 236	2086 ± 422	1216 ± 122
	древесина	174 ± 49	207 ± 61	340 ± 82	232 ± 71	231 ± 64	85 ± 30
	ветки	943 ± 212	680 ± 139	3074 ± 615	1443 ± 384	2075 ± 415	1230 ± 327
	листья	689 ± 164	277 ± 68	1375 ± 314	791 ± 214	1746 ± 367	970 ± 260
	корни	1322 ± 264	1098 ± 220	561 ± 137	867 ± 233	1271 ± 262	1848 ± 490
	желуди	–	225 ± 92	–	260 ± 113	–	171 ± 83

За 6-летний период наблюдений содержание ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr вопреки ожиданиям снизилось не во всех структурных компонентах деревьев дуба. В дубраве кисличной повысилось количество ⁹⁰Sr в корнях, в дубраве прируслово-пойменной – ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в древесине, а также ¹³⁷Cs в листьях (табл. 5).

Таблица 5

Текущее изменение удельной активности ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в компонентах деревьев дуба
(числитель – абсолютное, знаменатель – относительное, %)

Table 5

Current change of specific activity of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in components of oak trees (numerator – absolute, denominator – relative, %)

Дубрава		Прируслово-пойменная		Кисличная		Снытевая	
Изменения за		период	год	период	год	период	год
A _y ¹³⁷ Cs, Бк/кг	кора	–5 / –0,5	–0,8 / –0,1	–12707 / –92,6	–2117,8 / –15,4	–675 / –28,1	–112,5 / –4,7
	древесина	+134 / +22,9	+22,3 / +3,8	–288 / –36,2	–48,0 / –6,0	–155 / –14,9	–25,83 / –2,5
	ветки	–404 / –24,1	–67,3 / –4,0	–2427 / –62,0	–404,5 / –10,3	–5591 / –54,8	–931,8 / –9,1
	листья	+2107 / +55,6	+351,2 / +9,3	–9291 / –52,9	–1548,5 / –8,8	–26233 / –61,8	–4372,2 / –10,3
	корни	–898 / –43,5	–149,7 / –7,2	–1200 / –23,9	–200,0 / –4,0	–553 / –9,2	–92,2 / –1,5
A _y ⁹⁰ Sr, Бк/кг	кора	–648 / –22,1	–108,0 / –3,7	–311 / –26,0	–51,8 / –4,3	–870 / –41,7	–145,0 / –7,0
	древесина	+33 / +19,0	+5,5 / +3,2	–108 / –31,8	–18,0 / –5,3	–146 / –63,2	–24,3 / –10,5
	ветки	–263 / –27,9	–43,8 / –4,6	–1631 / –53,1	–271,8 / –8,8	–845 / –40,7	–140,8 / –6,8
	листья	–412 / –59,8	–68,7 / –10,0	–584 / –42,5	–97,3 / –7,1	–776 / –44,4	–129,3 / –7,4
	корни	–224 / –16,9	–37,3 / –2,8	+306 / +54,5	+51,0 / +9,1	–577 / –45,4	–96,2 / –7,6

Скорость и направленность краткосрочных изменений A_y ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в компонентах деревьев дуба в разных типах леса неодинаковы. Темпы изменения концентрации ¹³⁷Cs в коре, древесине и ветках повышаются в ряду дубрава прируслово-пойменная – дубрава снытевая – дубрава кисличная; в корнях – в направлении дубрава снытевая – дубрава кисличная – дубрава прируслово-пойменная, то есть по

градиенту уменьшения индекса почвенного увлажнения; в листьях – дубрава прируслово-пойменная – дубрава кисличная – дубрава снытевая – в направлении увеличения этого индекса и ПЗ ^{137}Cs . В ежегодно возобновляющихся листьях накопление радионуклидов зависит от уровня загрязнения и влажности почв, погодных и иных условий [2]. Темпы и направления изменений A_y ^{90}Sr по типам леса у всех компонентов дуба разные.

На периодическое повышение A_y и K_n ^{137}Cs в компонентах фитомассы сосны, прежде всего в физиологически активных ассимиляционных органах и побегах, указывается в работе [25]. В связи с различной динамикой сезонной концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr в органах и тканях [22] и несовпадением дат отбора биологического материала в 2018 и 2024 гг. (табл. 1) допускаем некоторые отклонения полученных данных фактором отбора.

В компонентах фитомассы сосны на автоморфных почвах в 1991–2014 гг. наблюдались циклические подъемы и падения K_n ^{137}Cs [25]. В ЗО ЧАЭС за 6 лет произошли разнонаправленные и разновеликие изменения K_n ^{137}Cs и ^{90}Sr в компоненты деревьев дуба. В дубравах кисличной и снытевой K_n ^{137}Cs в кору, листья, ветви снизились, в корни – увеличились, в древесину – не изменились. В дубаве прируслово-пойменной в древесину, кору и листья они увеличились, а в ветви и корни уменьшились. В дубравах кисличной и прируслово-пойменной K_n ^{90}Sr во все компоненты деревьев понизились, а в дубаве снытевой – повысились, кроме древесины (рис. 1).

В целом превалирует тенденция очищения органов и тканей дуба от радионуклидов, прежде всего от ^{137}Cs . Заметим, что переход радионуклидов в компоненты растений очень сильно зависит от влажности почвы, с повышением которой K_n ^{137}Cs , как правило, резко возрастают, а K_n ^{90}Sr , в зависимости от компонента, снижаются (чаще всего), или незначительно возрастают [2].

Ранжированные ряды K_n ^{137}Cs и ^{90}Sr в компоненты деревьев дуба различаются по типам леса и годам наблюдений. Общим для обоих радионуклидов и всех типов леса являются минимальные их величины в древесине, а для ^{137}Cs – максимальные их значения в желудях и листьях (табл. 6). Заметим, что в 2024 г. K_n ^{137}Cs в желуди составляли в дубаве прируслово-пойменной – 17,3, кисличной – 35,6, снытевой – $26,3 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, ^{90}Sr – 8,1, 4,6 и $2,0 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, соответственно.

Таблица 6

Ранжированные ряды коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в компоненты деревьев дуба

Table 6

Ranked series of ^{137}Cs and ^{90}Sr transition coefficients in to components of oak trees

Дубрава	Год	K_n ^{137}Cs	K_n ^{90}Sr
Кисличная	2018	древесина < ветви < корни < кора < листья	древесина < корни < кора < листья < ветви
	2024	древесина < кора < ветки < корни < листья < желуды	древесина < желуды < листья < корни < кора < ветки
Снытевая	2018	древесина < кора < корни < ветви < листья	древесина < корни < листья < кора < ветви
	2024	древесина < кора < ветви < корни < желуды < листья	древесина < желуды < листья < кора < ветви < корни
Прируслово-пойменная	2018	древесина < кора < ветви < корни < листья	древесина < листья < ветви < корни < кора
	2024	древесина < кора < корни < ветви < желуды < листья	древесина < желуды < листья < ветви < корни < кора

В 2018 г. все ранжированные ряды K_n ^{137}Cs и ^{90}Sr в компоненты деревьев дуба различались между собой по типам леса. В 2024 г. наблюдалось почти универсальное распределение органов и тканей по уровням перехода ^{137}Cs – древесина < кора < ветви < корни < желуды < листья, за исключением звена «... < листья < желуды» в дубаве кисличной. В том же году для ранжированных рядов K_n ^{90}Sr общим для всех типов дубрав было их начальное звено – «древесина < желуды < листья < ...», вторая часть ряда в каждом типе леса была индивидуальной.

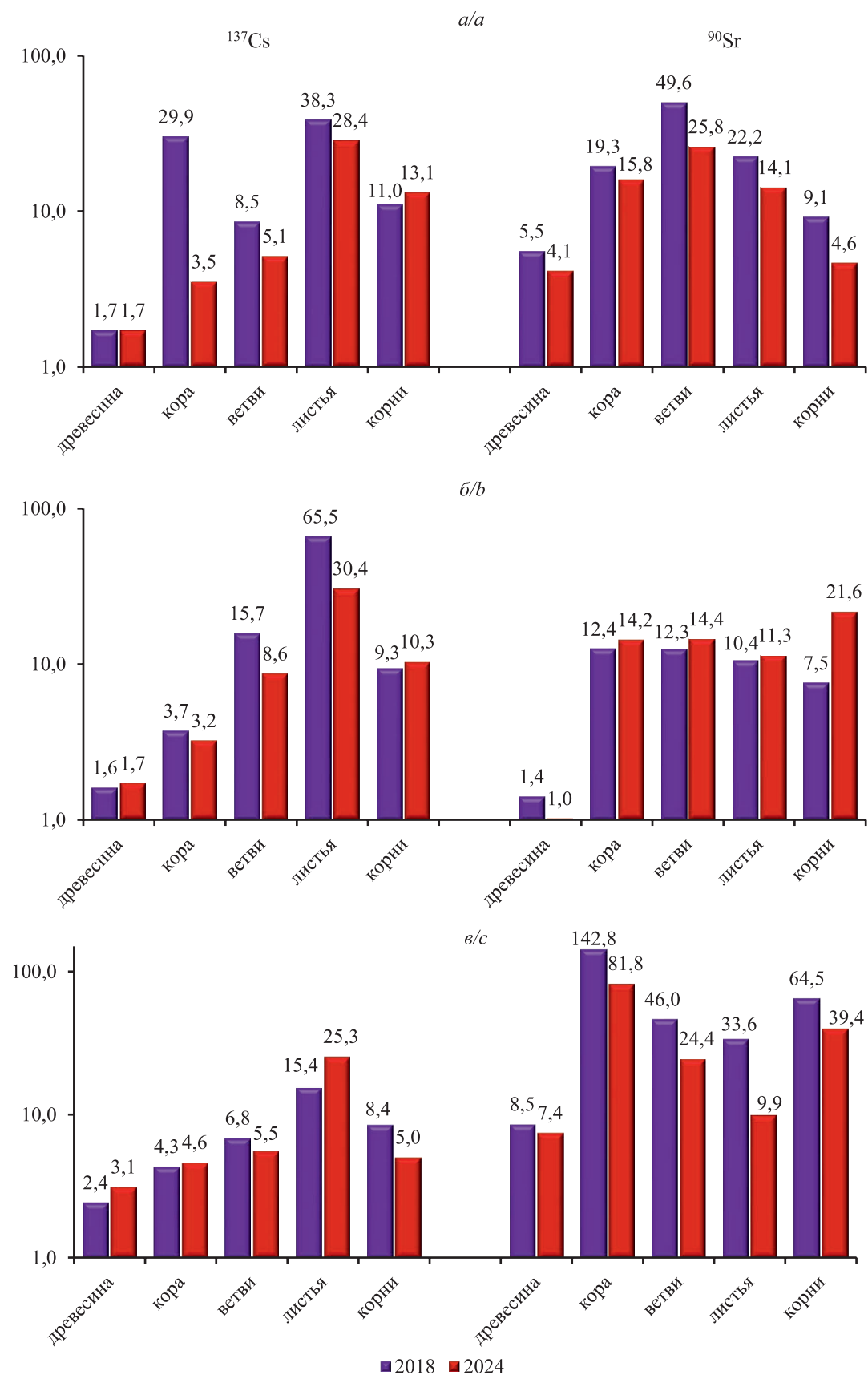


Рис. 1. Текущие изменения коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr в компоненты дуба в дубравах кисличной (а), снытевой (б) и прируслово-пойменной (в), $n \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

Fig. 1. Current changes of ^{137}Cs and ^{90}Sr transition coefficients into oak components in wood sorrel (a), goutweed (b) and riverbed-floodplain (c) oak forests, $n \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$

Иные распределения $K_{\text{п}}$ ^{137}Cs и ^{90}Sr в структурных компонентах дуба помещены в работе [2]. Приведенные ряды различаются территориально и во времени, что зависит от целого комплекса факторов – физико-химической формы выпадений радионуклидов, типа и влажности почвы, типа фитоценоза, возраста древостоя, погоднo-климатических условий и других факторов. Общим для них является минимальные величины загрязнения древесины дуба, максимальные – его наружной коры. Этим, а также особенностями видового накопления радионуклидов [2; 15; 16], объясняются различия ранжированных рядов $A_{\text{у}}$ и $K_{\text{п}}$ ^{137}Cs и ^{90}Sr в органах и тканях не только дуба, но и видов подростa, подлеска и ЖНП, приведенных ниже.

Подрост, подлесок. Текущие изменения $K_p^{137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в органы и ткани подроста и подлеска были неоднозначными. В дубраве кисличной $K_p^{137}\text{Cs}$ в компоненты подроста и подлеска за 6 лет увеличились у большинства видов, за исключением корней и стволиков ясеня, в которых произошло их снижение. В то же время $K_p^{90}\text{Sr}$ уменьшились в большей части органов данного ценоэлемента, кроме листьев клена и ясеня и всех компонентов подлеска крушины ломкой – в них переход радионуклида повысился (рис. 2).

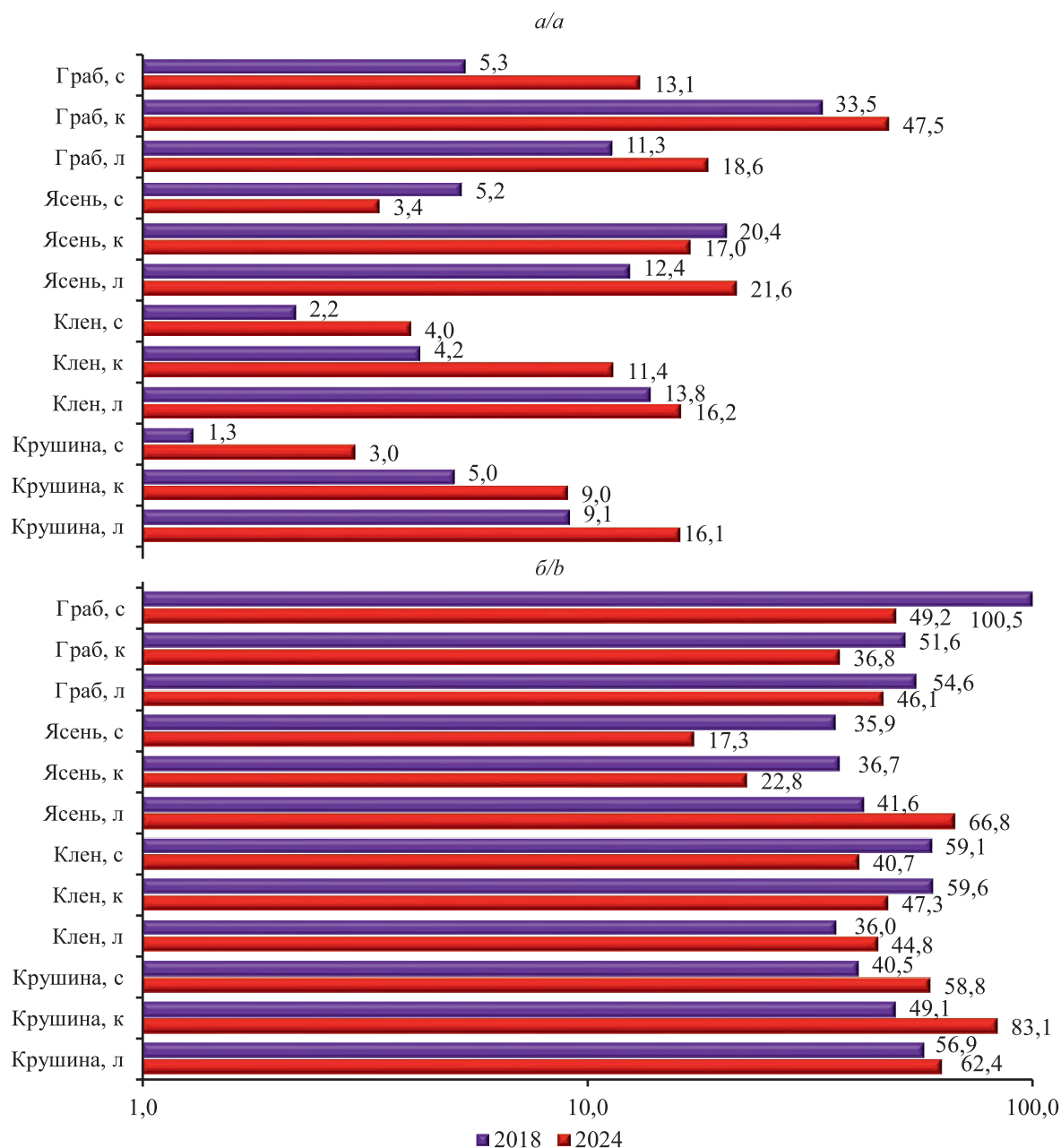


Рис. 2. Коэффициенты перехода ^{137}Cs (а) и ^{90}Sr (б) в компоненты подроста и подлеска в дубраве кисличной, $n \times 10^{-3}$ м²/кг (здесь и далее: с – стволы; к – корни; л – листья)

Fig. 2. Transition coefficients of ^{137}Cs (a) and ^{90}Sr (b) into components of undergrowth and understorey in wood sorrel oak forest, $n \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ (Here and further: c – trunks, κ – roots, and л – leaves)

В дубраве снытевой $K_n^{137}\text{Cs}$ понизились во всех органах граба, клена и ясеня, а также возросли у вяза и лещины. Произошел рост $K_n^{90}\text{Sr}$ во все компоненты вяза, клена, ясеня, лещины и листья граба и снижение в корнях и стволиках граба (рис. 3). В дубраве прируслово-пойменной $K_n^{137}\text{Cs}$ увеличились во все компоненты дуба, осины, крушины ломкой и березы (кроме корней) и снизились в корнях березы и всех органах ивы серой. Во всех компонентах всех видов подроста и подлеска $K_n^{90}\text{Sr}$ снизились (рис. 4).

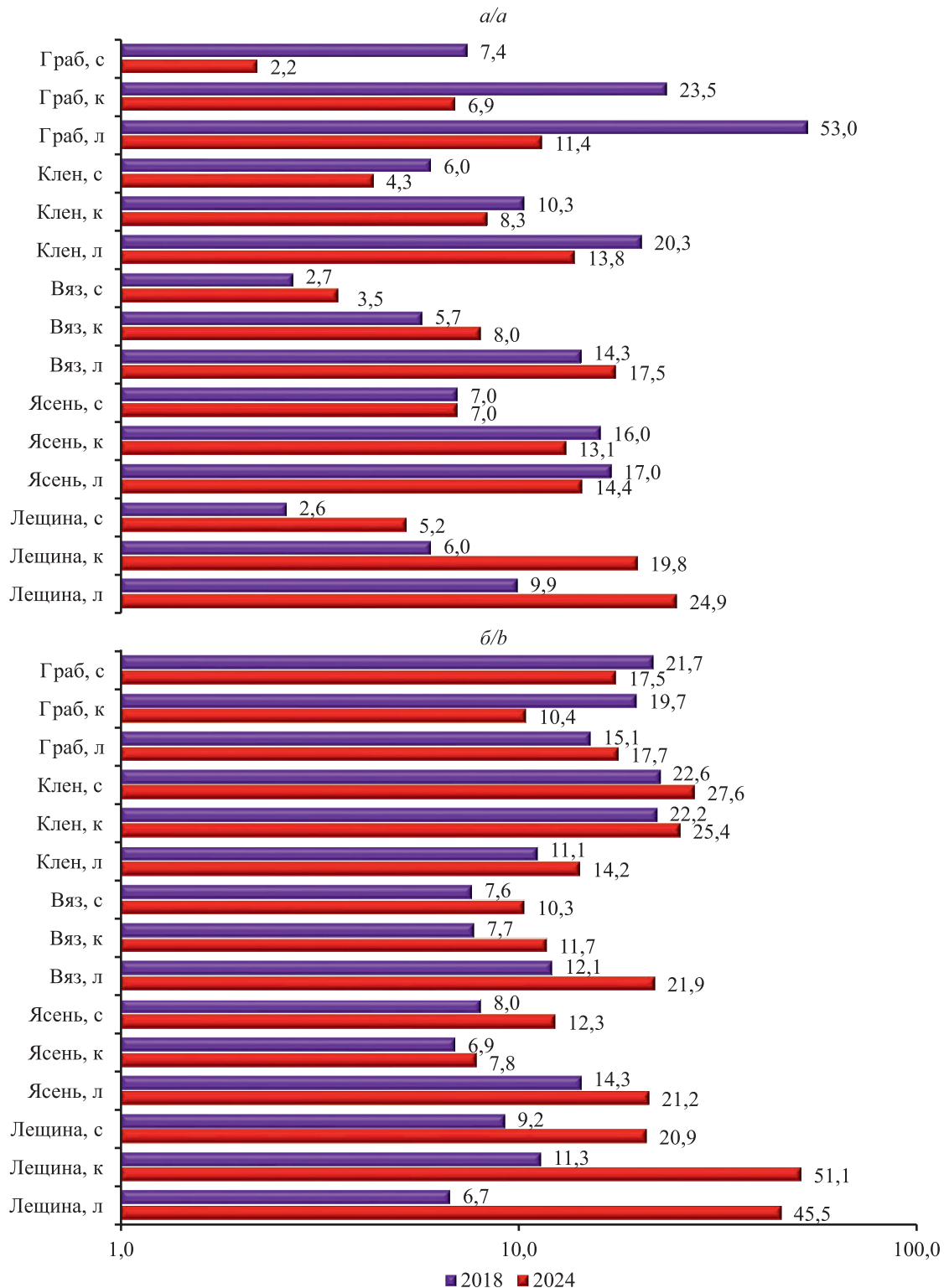


Рис. 3. Коэффициенты перехода ^{137}Cs (а) и ^{90}Sr (б) в компоненты подроста и подлеска в дубраве снытевой, $n \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

Fig. 3. Transition coefficients of ^{137}Cs (a) and ^{90}Sr (b) into components of undergrowth and understory in goutweed oak forest, $n \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$

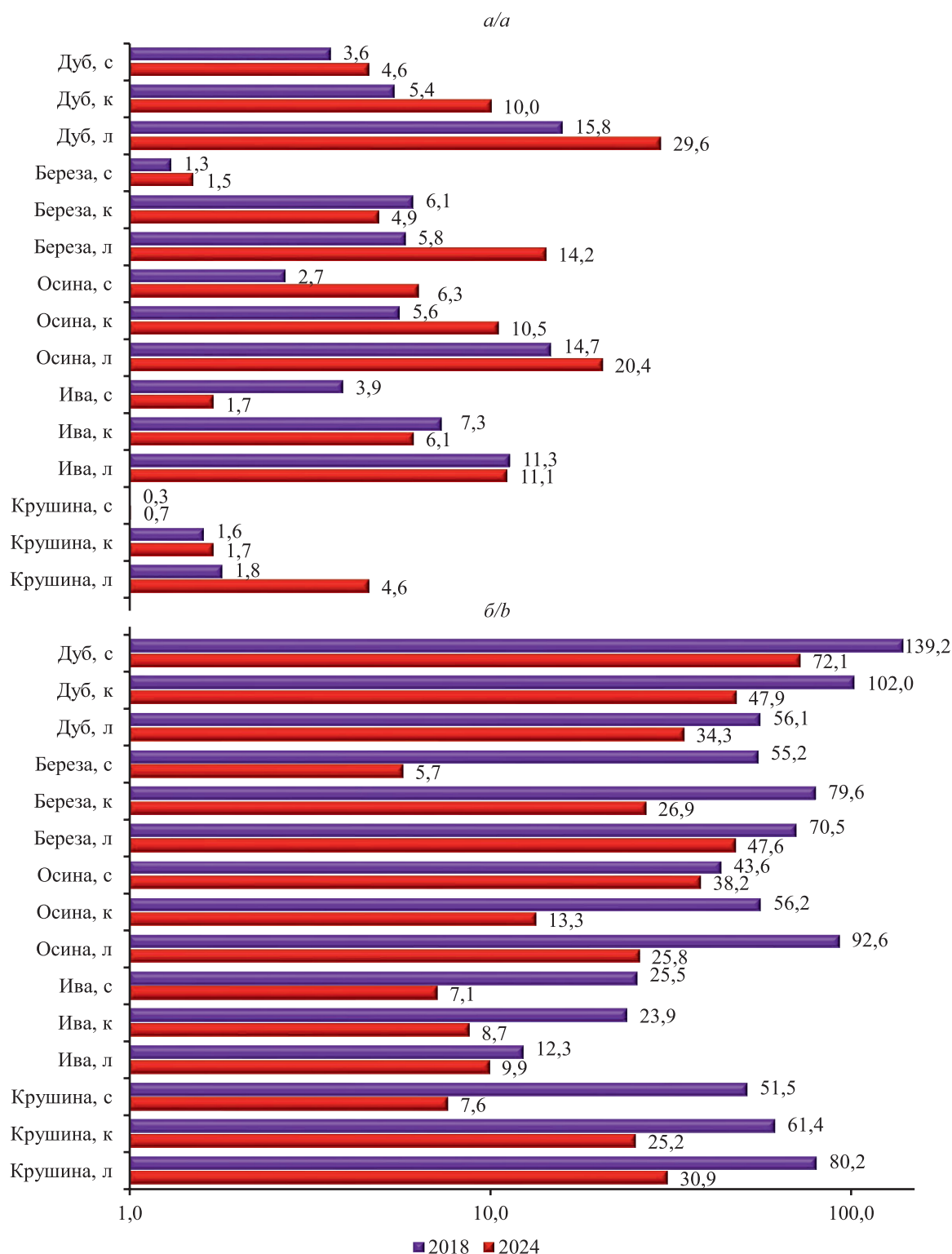


Рис. 4. Коэффициенты перехода ^{137}Cs (а) и ^{90}Sr (б) в компоненты подроста и подлеска в дубраве прируслово-пойменной, $n \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

Fig. 4. Transition coefficients of ^{137}Cs (a) and ^{90}Sr (b) into components of undergrowth and understorey in riverbed-floodplain oak forest, $n \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$

Ранжирование органов растений подроста и подсека по уровням перехода в них ^{137}Cs и ^{90}Sr показало определенные различия построенных рядов в зависимости от радионуклида, типа леса, вида растения и срока наблюдения (табл. 7). При этом для большинства древесных и кустарниковых пород в разных типах леса и в разные годы в 86,7 % случаев (26 наблюдений из 30) прослеживается снижение K_n ^{137}Cs в ряду «стволи-

ки < корни < листья». В дубраве снытевой данный ряд в оба срока наблюдений был универсальным. Для граба в 2018 и 2024 гг., ясеня и березы в 2018 г. в дубравах кисличной и прируслово-пойменной (4 наблюдения, или 13,3 % случаев) накопление этого радионуклида уменьшалось в ряду «стволики < листья < корни».

Таблица 7

Ранжированные ряды коэффициентов перехода ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в компоненты подроста и подлеска

Table 7

Ranked series of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr transition coefficients into components of undergrowth and understory

¹³⁷ Cs		⁹⁰ Sr	
Дубрава кисличная			
Вид растения, год наблюдения	Ряд	Вид растения, год наблюдения	Ряд
Граб – 2018, 2024; ясень – 2018	Стволики < листья < корни	Клен, крушина – 2024	Стволики < листья < корни
Клен, крушина, лещина – 2018, 2024; ясень – 2024	Стволики < корни < листья	Ясень – 2018, 2024; крушина – 2018; лещина – 2024	Стволики < корни < листья
–	–	Граб – 2018,2024	Корни < листья < стволики
–	–	Клен – 2018	Листья < стволики < корни
–	–	Лещина – 2018	Корни < стволики < листья
Дубрава снытевая			
Граб, вяз, клен, ясень, лещина – 2018, 2024	Стволики < корни < листья	Вяз – 2018, 2024	Стволики < корни < листья
–	–	Клен – 2018, 2024; граб – 2018	Листья < корни < стволики
–	–	Ясень – 2018, 2024; граб – 2024	Корни < стволики < листья
		Лещина – 2018	Листья < стволики < корни
–	–	Лещина – 2024	Стволики < листья < корни
Дубрава прируслово-пойменная			
Дуб, крушина, осина, ива – 2018, 2024; береза – 2024	Стволики < корни < листья	Крушина – 2018, 2024; осина – 2018; ива, береза – 2024	Стволики < корни < листья
Береза – 2018	Стволики < листья < корни	Береза – 2024	Стволики < листья < корни
–	–	Дуб – 2018	Листья < стволики < корни
–	–	Ива – 2018; дуб – 2024	Листья < корни < стволики
–	–	Осина – 2024	Корни < листья < стволики

Намного сложнее обстоит ситуация со ⁹⁰Sr. В каждом из трех типов дубрав установлено по 5 разных ранжированных рядов распределения компонентов подроста и подлеска по уровням К_п ⁹⁰Sr. В дубраве кисличной наиболее часто (в 40 % случаев) ряд имеет вид «стволики < корни < листья», характерный для распределения К_п ¹³⁷Cs. Из остальных 4 вариантов отметим ряд «стволики < листья < корни» (20 % случаев), также свойственный для К_п ¹³⁷Cs. В дубраве снытевой на вариант «стволики < корни < листья» приходится 20 % распределений, на вариант «стволики < листья < корни» – 10 %. Наиболее распространенный ряд в этом типе леса «корни < стволики < листья». В дубраве прируслово-пойменной ряд «стволики < корни < листья» включает половину распределений, «стволики < листья < корни» – 10 %. Во всех типах леса на две даты наблюдений из 30 ранжированных рядов на вариант распределения К_п ⁹⁰Sr «стволики < корни < листья» выпадает 11 (36,7 %) наблюдений, на вариант «стволики < листья < корни» – 4 (13,3 %), на остальные 3 варианта приходится от 1 до 3 наблюдений.

Таким образом, К_п ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в органы подроста и подлеска наиболее часто (в 61,7 % случаев) ранжируются по варианту «стволики < корни < листья».

Живой напочвенный покров. В 2018 г. К_п ¹³⁷Cs в надземную фитомассу были выше, чем в подземную у ландыша майского в дубравах кисличной и злаково-пойменной, а у ландыша майского и сныти обыкновенной в дубраве снытевой – ниже в сравнении с подземной частью. У купены лекарственной в дубраве снытевой они были близкими. В 2024 г. К_п ¹³⁷Cs в подземные части растений были выше, чем в надземные у ландыша майского во всех трех типах леса и у купены лекарственной в дубраве снытевой. У сныти обыкновенной в дубраве снытевой накопление радионуклида было большим в надземной фитомассе. У молинии голубой в дубраве злаково-пойменной в оба срока наблюдения К_п ¹³⁷Cs в обе части растения были близкими (рис. 5).

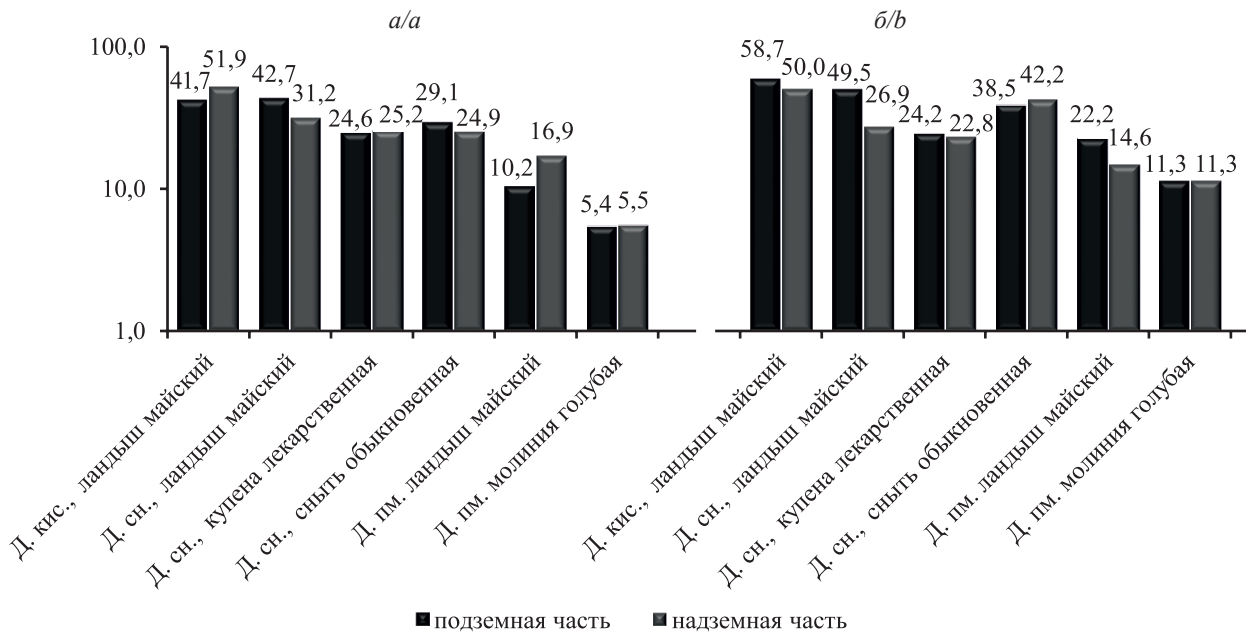


Рис. 5. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в фитомассу фоновых видов живого напочвенного покрова, $n \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$: а – 2018 г., б – 2024 г.

Fig. 5. Transition coefficients of ^{137}Cs into phytomass of background living ground cover species, $n \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$: а – 2018, б – 2024

В 2024 г. в сравнении с 2018 г. $K_{\text{п}}$ ^{137}Cs в надземную фитомассу снизились у ландыша майского во всех типах дубрав и купены лекарственной в дубраве снытевой, увеличились – у сныти обыкновенной и молинии голубой. Переход радионуклида в подземную фитомассу вырос у ландыша майского во всех типах дубрав, у молинии голубой и фактически не изменился у купены лекарственной (рис. 5).

В 2018 г. $K_{\text{п}}$ ^{90}Sr в подземную фитомассу у всех отобранных растений ЖНП, кроме молинии голубой, были в 1,2–3,4 выше в сравнении с надземной, а в 2024 г. они в 1,4–3,1 раза уступали надземной, за исключением молинии голубой. Для последней характерно превышение $K_{\text{п}}$ ^{90}Sr в надземную фитомассу в 2018 г. и в подземную – в 2024 г. Во временном аспекте к 2024 г. $K_{\text{п}}$ ^{90}Sr в надземные части растений выросли в 2,1–6,4 раза, кроме молинии голубой (уменьшились в 3,8 раз), а в подземные – снизились в 1,1–2,6 раза, у молинии голубой рост в 1,6 раза (рис. 6).

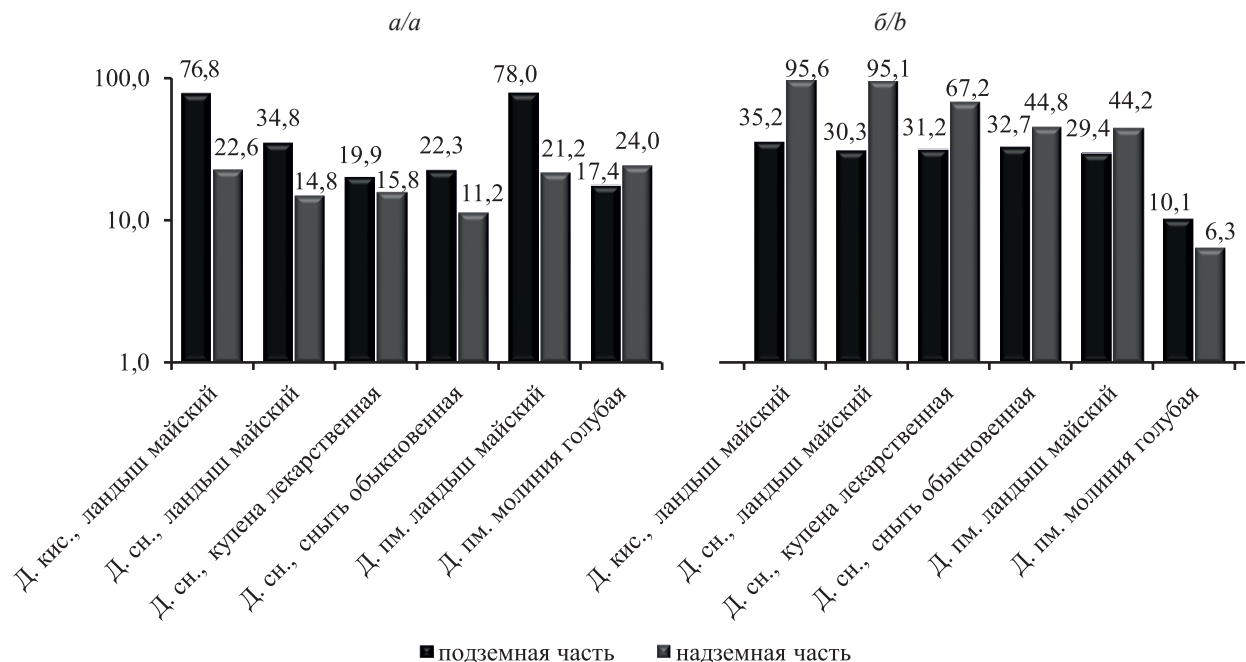


Рис. 6. Коэффициенты перехода ^{90}Sr в фитомассу фоновых видов живого напочвенного покрова, $n \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$: а – 2018 г., б – 2024 г.

Fig. 6. Transition coefficients of ^{90}Sr into phytomass of background living ground cover species, $n \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$: а – 2018, б – 2024

Ранжированные ряды A_y и K_n ^{137}Cs и ^{90}Sr в частях фитомассы ландыша майского весьма неоднозначны (табл. 8).

Таблица 8

Ранжированные ряды типов леса по показателям загрязнения фитомассы ландыша майского ^{137}Cs и ^{90}Sr

Table 8

Ranked series of forest types according to the contamination of May lily of the valley phytomass with ^{137}Cs and ^{90}Sr

Фитомасса	Год	^{137}Cs		^{90}Sr	
		A_y	K_n	A_y	K_n
Надземная	2018	кис. < пр.-пм < сн.	пр.-пм. < кис. < сн.	пр.-пм. < кис. < сн.	сн. < кис. < пр.-пм.
	2024	пр.-пм. < сн. < кис.	пр.-пм. < сн. < кис.	пр.-пм. < кис. < сн.	пр.-пм. < сн. < кис.
Подземная	2018	кис. < сн. < пр.-пм.	пр.-пм. < сн. < кис.	пр.-пм. < кис. < сн.	сн. < пр.-пм. < кис.
	2024	пр.-пм. < кис. < сн.	пр.-пм. < сн. < кис.	пр.-пм. < кис. < сн.	пр.-пм. < сн. < кис.

Примечание: кис. – дубрава кисличная, сн. – дубрава снытевая, пр.-пм. – дубрава прируслово-пойменная.

Выявлено универсальное распределение роста A_y ^{90}Sr в обеих частях фитомассы ландыша майского и в оба срока наблюдений, а также A_y ^{137}Cs в подземной фитомассе его в 2024 г. по нарастанию индексов влажности и трофности эдафотопов – «дубрава прируслово-пойменная < дубрава кисличная < дубрава снытевая». Наиболее характерным для K_n ^{137}Cs (кроме одного случая) и K_n ^{90}Sr (в половине случаев) было распределение «дубрава прируслово-пойменная < дубрава снытевая < дубрава кисличная».

Заключение

За краткосрочный период (2018–2024 гг.) радиационная обстановка в высоковозрастных дубравах 3О ЧАЭС значительно улучшилась почти по всем параметрам, за исключением дубравы прируслово-пойменной, где произошел рост содержания ^{90}Sr в 20-сантиметровом слое почвы. Темпы снижения МД составили 1,0–3,2, A_y ^{137}Cs – 1,6–7,6, ПЗ ^{137}Cs – 0,9–6,1 %/год. В суходольных дубравах A_y ^{90}Sr снижалась со скоростью 3,7–10,0, ПЗ ^{90}Sr – 1,6–8,2 %/год. В дубраве прируслово-пойменной темпы их увеличения составили 4,9 и 5,9 %/год соответственно. Наиболее вероятной причиной роста загрязнения верхней 20-сантиметровой почвенной толщи стал высокий паводок в 2023 г.

Текущие изменения показателей загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr органов и тканей деревьев дуба, растений подроста и подлеска, частей фитомассы фоновых видов ЖНП были разнонаправленными и разновеликими и зависели от вида растения и его структурного компонента, типа леса, года наблюдения. В большинстве компонентов деревьев дуба содержание ^{137}Cs снижалось, а их темпы возрастали по мере ускорения очищения верхних 20-сантиметровых слоев почв от данного радионуклида; в отдельных компонентах – в направлениях увеличения или снижения индекса влажности почвы. Векторы и темпы изменений A_y ^{90}Sr в компонентах дуба были разными.

Ранжированные ряды K_n ^{137}Cs и ^{90}Sr в компоненты деревьев дуба и органы подроста и подлеска различаются по типам леса и срокам наблюдений. Общим для них являются минимальные значения K_n ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесине и максимальные K_n ^{137}Cs в желудях и листьях. В 2024 г. во всех типах леса общим был ранжированный ряд K_n ^{137}Cs (древесина < кора < корни < ветви < желуди < листья) и часть ряда K_n ^{90}Sr (древесина < желуди < листья). Для органов подроста и подлеска наиболее часто встречающимися были ряды K_n ^{137}Cs «стволики < корни < листья» и K_n ^{90}Sr – «стволики < листья < корни».

Для ландыша майского выявлено общее увеличение A_y ^{90}Sr в обеих частях фитомассы и в оба срока наблюдений и A_y ^{137}Cs в подземной фитомассе в 2024 г. в ряду типов леса «дубрава прируслово-пойменная < дубрава кисличная < дубрава снытевая», соответствующее повышению индексов влажности и трофности эдафотопов. Для K_n ^{137}Cs (75 % значений) и ^{90}Sr (50 % значений) в части фитомассы ландыша майского наиболее характерным было увеличение их величин в лесотипологическом ряду «дубрава прируслово-пойменная < дубрава снытевая < дубрава кисличная».

Библиографические ссылки

1. Ипатьев ВА, Багинский ВФ, Булавик ИМ, Дворник АМ, Волчков ВЕ, Гончаренко ГГ, Поджаров ВК, Булко НИ, Бордок ИВ, Волович ПИ, Гедых ВБ, Гримашевич ВВ, Диденко ЛГ, Есимчик ЛД, Жученко ТА, Кейзер ГИ, Ковалевич АИ, Кожевников АМ, Колодий ПВ, Копытков ВВ, Крушев ЛТ, Марченко ЯИ, Митин НВ, Падутов АЕ, Падутов ВЕ, Переволоцкий АН, Пикулик ММ, Сидор АИ, Силян АЕ, Степанчик ВВ, Тарасенко ВП, Трухоневец ВВ, Усеня ВВ, Фомина ВИ, Хотылева ЛВ, Чунихин ЛА, Шевчук ВЕ, Яцына АА. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации. Гомель: Речицкая укрупненная типография; 1999. 454 с.

2. Щеглов АИ. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. Москва: Наука; 2000. 268 с.
3. Переволоцкий АН. Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах. Гомель: Институт радиологии; 2006. 255 с.
4. Краснов ВП, Орлов ОО, Бузун ВО, Ландін ВП, Шелест ЗМ. Прикладна радіоекологія лісу. Житомир: Полісся; 2007. 680 с.
5. Якушев БИ, Мартинович БС, Сак ММ, Голушко РМ, Матусов ГД. Система радиоэкологического мониторинга лесов. В: *Мониторинг и оценка состояния растительного покрова. Материалы международной научно-практической конференции, г. Минск, 28–31 октября 2003 г.* Минск: Право и экономика; 2003. с. 20–21.
6. Переволоцкий АН, Переволоцкая ТВ. Обоснование ведения системы радиоэкологического мониторинга в лесных биогеоценозах на различных этапах после аварийных радиоактивных выпадений. *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2012;52(3):312–316.
7. Рошин ВЕ, Матусов ГД. Системно-факторный радиационно-экологический мониторинг лесных биоценозов ППРЭЗ. В: *Радиация и Чернобыль: наука и практика. Материалы Международной научной конференции, г. Гомель, 13–14 октября 2011 г.* Минск: Институт радиологии; 2011. с. 150–152.
8. Гарбарук ДК, Углынец АВ, Шумак СВ. Радиационно-экологический мониторинг лесных экосистем зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. В: *Моніторинг і оцінка стану рослинного свету = Мониторинг и оценка состояния растительного мира = Vegetation Monitoring and Assessment. Матэрыялы VI Міжнароднай навуковай канферэнцыі, г. Мінск – аг. Ляскавічы, 9–13 кастрычніка 2023 г.* Мінск: ІВЦ Мінфіна; 2023. с. 191–193.
9. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr компонентами древостоя, подроста и подлеска в дубравах зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства.* 2019;79:236–247.
10. Гарбарук ДК, Углынец АВ. Загрязнение живого напочвенного покрова ^{137}Cs и ^{90}Sr в дубравах зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. В: *Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов. Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, приуроченной к 1000-летию г. Бреста, г. Брест, 12–14 сентября 2019 г.* Брест: БрГУ; 2019;1:205–208.
11. Ковязин ВФ, Мартынов АН, Мельников ЕС, Аникин АС, Минаев ВН, Беляева НВ. Основы лесного хозяйства и таксация леса. Санкт-Петербург: Лань; 2010. 384 с.
12. Мирошников ВС, Труль ОА, Ермаков ВЕ, Дольский ЛВ, Костенко АГ. *Справочник таксатора.* Минск: Ураджай; 1980. 360 с.
13. Кузьменков МВ, Кулагин АП, Таркан АВ, Бузуновский РС. *Таксационно-лесоустроительный справочник.* Минск: Лесное и охотничье хозяйство; 2019. 335 с.
14. Гарбарук ДК, Углынец АВ, Шумак СВ, Воронечкая АН, Турчин ЛМ. Изменения в основных ценозлементах дубрав зоны отчуждения Чернобыльской АЭС (белорусский сектор). *Ботаника (исследования).* 2025;55:69–76.
15. Парфенов ВИ, Якушев БИ, Мартинович БС, Заболотный АИ, Дмитриева СА, Кабашникова ГИ, Кауров ИА, Моисеенко ИФ, Рахтеенко ЛИ, Савельев ВВ, Будкевич ТА, Ермакова ОО, Федоров ВН, Болотских ТН, Казей АП, Кузьмич ОТ, Пискунов ВС, Сак ММ, Голушко РМ, Жмойдяк РН. *Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси (в связи с аварией на Чернобыльской АЭС).* Минск: Навука і тэхніка; 1995. 582 с.
16. Булавик ИМ, Переволоцкий АН, Гайдуль АЗ. Влияние различных факторов на накопление ^{137}Cs древесными растениями. *10 лет Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику.* Гомель: [и. н.]; 1998. с. 59–70.
17. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Оценка загрязнения древесины и коры дуба ^{137}Cs в зоне отчуждения Чернобыльской атомной электростанции. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;4:33–45. DOI: 10.46646/2521-683X/2022-4-33-45.
18. Гарбарук ДК, Углынец АВ, Кудин МВ. Изменение радиационной обстановки в сосняках мшистых в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2021;61(5):524–535. DOI: 10.31857/S0869803121050064.
19. Переволоцкая ТВ, Булавик ИМ, Переволоцкий АН. О влиянии подтопления на распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесном биогеоценозе. *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2009;49(3):291–301.
20. Булко НИ, Шабалева МА, Митин НВ, Толкачева НВ, Козлов АК. Особенности длительных процессов миграции чернобыльского ^{137}Cs в автоморфных и гидроморфных почвах сосновых фитоценозов в дальней зоне аварии на ЧАЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства.* 2015;75:391–404.
21. Булко НИ, Толкачева НВ, Потапенко АМ, Козлов АК, Машков ИА, Митин НВ, Шабалева МА, Серенкова ВА, Бутыковец ВВ. Поведение ^{137}Cs в лесных почвах (факторы, динамика, прогноз). В: *Лесные экосистемы: современные вызовы, состояние, продуктивность и устойчивость. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Института леса НАН Беларуси, г. Гомель, 13–15 ноября 2020 г.* Гомель: Институт леса НАН Беларуси; 2020. с. 314–319.
22. Щеглов АИ, Цветнова ОБ. Основные закономерности сезонной и многолетней динамик накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесине. *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2004;44(1):113–117.
23. Забродский ВН, Углынец АВ, Калинин ВН, Блинова НВ, Кудин МВ. Влияние типа леса и типа лесорастительных условий на переход ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесину сосны в зоне отчуждения ЧАЭС по данным радиационного обследования лесосек. В: *Современные проблемы радиобиологии – 2021. Материалы Международной научной конференции, г. Гомель, 23–24 сентября 2021 г.* Минск: ИВЦ Минфина; 2021. с. 68–72.
24. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Современное загрязнение стволов дуба ^{90}Sr в ближней зоне радиоактивных выпадений чернобыльского следа. *Проблемы лесоведения и лесоводства.* 2023;83:282–293.
25. Булко НИ, Шабалева МА, Митин НВ, Толкачева НВ, Козлов АК. Динамика длительных процессов поступления ^{137}Cs в компоненты фитомассы сосны обыкновенной из автоморфных почв в дальней зоне аварии на ЧАЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства.* 2016;76:371–379.

References

1. Ipat'ev VA, Baginskii VF, Bulavik IM, Dvornik AM, Volchkov VE, Goncharenko GG, Podzharov VK, Bulko NI, Bordok IV, Volovich PI, Gedykh VB, Grimashevich VV, Didenko LG, Esimchik LD, Zhuchenko TA, Keizer GI, Kovalevich AI, Kozhevnikov AM, Kolodii PV, Kopytkov VV, Krushev LT, Marchenko YaI, Mitin NV, Padutov AE, Padutov VE, Perevolotskii AN, Pikulik MM, Sidor AI, Silin AE, Stepanchik VV, Tarasenko VP, Trukhonovets VV, Usenya VV, Fomina VI, Khotyleva LV, Chunikhin LA, Shevchuk VE, Yatsyna AA. *Les. Chelovek. Chernobyl'. Lesnye ekosistemy posle avarii na Chernobyl'skoi AES: sostoyaniye, prognoz, reaksiya naseleniya, puti reabilitatsii* [Forest. Human. Chernobyl. Forest ecosystems after the accident at the Chernobyl NPP: condition, prediction, response of the population, ways of rehabilitation]. Gomel': Rechitskaya ukрупnennaya tipografiya, 1999. 454 p. Russian.
2. Shcheglov AI. *Biogekhimiya tekhnogennykh radionuklidov v lesnykh ekosistemakh: po materialam 10-letnikh issledovaniy v zone vliyaniya avarii na ChAES* [Biogeochemical migration of technogenic radionuclides in forest ecosystems: by the materials of 10-year research in the area effected by the Chernobyl accident]. Moscow: Nauka; 2000. 268 p. Russian.

3. Perevolotskii AN. *Raspredelenie ^{137}Cs i ^{90}Sr v lesnykh biogeotsenozakh* [Distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in forest biogeocenoses]. Gomel': Institut radiologii; 2006. 255 p. Russian.
4. Krasnov VP, Orlov OO, Buzun VO, Landin VP, Shelest ZM. *Prikladna radioekologiya lisu* [Applied radioecology of the forest]. Zhitomir: Polissya; 2007. 680 p. Russian.
5. Yakushev BI, Martinovich BS, Sak MM, Golushko RM, Matusov GD. *Sistema radioekologicheskogo monitoringa lesov* [System of the radioecological monitoring of forests]. In: *Monitoring i otsenka sostoyaniya rastitel'nogo pokrova* [Monitoring and estimation of vegetative cover]. Minsk: Pravo i ekonomika; 2003. p. 20–21. Russian.
6. Perevolotskii AN, Perevolotskaya TV. *Obosnovanie vedeniya sistemy radioekologicheskogo monitoringa v lesnykh biogeotsenozakh na razlichnykh etapakh posle avariynykh radioaktivnykh vypadenii* [Substantiation of radio-ecological monitoring of forest ecosystems at various stages after the accident fallout]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2012;52(3):312–316. Russian.
7. Roshchin VE, Matusov GD. *Sistemno-faktorniy radiatsionno-ekologicheskii monitoring lesnykh biotsenozov PGREZ* [System-factor radiation-ecological monitoring of forest biocenoses of PSRER]. In: *Radiatsiya i Chernobyl': nauka i praktika* [Radiation and Chernobyl: science and practice]. Minsk: Institut radiologii; 2011. p. 150–152. Russian.
8. Garbaruk DK, Uglyanets AV, Shumak SV. *Radiatsionno-ekologicheskii monitoring lesnykh ekosistem zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [Radiation-ecological monitoring of forest ecosystems of the Chernobyl NPP exclusion zone]. In: *Monitoring i otsenka sostoyaniya rastitel'nogo mira* [Vegetation Monitoring and Assessment]. Minsk: IVTs Minfina; 2023. p. 191–193. Russian.
9. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Nakoplenie ^{137}Cs i ^{90}Sr komponentami drevostoya, podrosta i podleska v dubravakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [^{137}Cs and ^{90}Sr accumulation of stand, regrowth and undergrowth components in oak forests of the Chernobyl NPP exclusion zone]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2019;79. p. 236–247. Russian.
10. Garbaruk DK, Uglyanets AV. *Zagryaznenie zhivogo napochvennogo pokrova ^{137}Cs i ^{90}Sr v dubravakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [Contamination of living ground cover with ^{137}Cs and ^{90}Sr in oak forests of the Chernobyl NPP exclusion zone]. In: *Aktual'nye problemy nauk o Zemle: issledovaniya transgranichnykh regionov* [Current issues sciences of Earth: studies of transboundary regions]. Brest: BrGU; 2019;1:205–208. Russian.
11. Kovyazin VF, Martynov AN, Mel'nikov ES, Anikin AS, Minaev VN, Belyaeva NV. *Osnovy lesnogo khozyaistva i taksatsiya lesa* [Fundamentals of forestry and forest inventory]. Saint Petersburg: Lan'; 2010. 384 p. Russian.
12. Miroshnikov VS, Trull' OA, Ermakov VE, Dol'skii LV, Kostenko AG. *Spravochnik taksatora* [Taxator's Handbook]. Minsk: Uradzhai; 1980. 360 p. Russian.
13. Kuz'menkov MV, Kulagin AP, Tarkan AV, Buzunovskii RS. *Taksatsionno-lesoustroitel'nyy spravochnik* [Taxation and forest inventory guide]. Minsk: Lesnoye i okhotnich'ye khozyaistvo; 2019. 335 p. Russian.
14. Garbaruk DK, Uglyanets AV, Shumak SV, Voronetskaya AN, Turchin LM. *Izmeneniya v osnovnykh tsenoelementakh dubrav zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES (belorusskii sektor)* [Changes in the main cenoelements oak forests of the Chernobyl nuclear power plant exclusion zone (belarusian sector)]. *Botanika (issledovaniya)*. 2025;55:69–76. Russian.
15. Parfenov VI, Yakushev BI, Martinovich BS, Zabolotnyi AI, Dmitrieva SA, Kabashnikova GI, Kaurov IA, Moiseenko IF, Rakhteenko LI, Savel'ev VV, Budkevich TA, Ermakova OO, Fedorov VN, Bolotskikh TN, Kazei AP, Kuz'mich OT, Piskunov VS, Sak MM, Golushko RM, Zhmoidyak RN. *Radioaktivnoe zagryaznenie rastitel'nosti Belarusi (v svyazi s avariei na Chernobyl'skoi AES)* [Radioactive contamination of vegetation in Belarus (in connection with the Chernobyl NPP accident)]. Minsk: Navuka i tekhnika; 1995. 582 p. Russian.
16. Bulavik IM, Perevolotskii AN, Gaidul' AZ. *Vliyanie razlichnykh faktorov na nakoplenie ^{137}Cs drevesnymi rasteniyami* [Influence of various factors on ^{137}Cs accumulation by woody plants]. *10 let Polesskomu gosudarstvennomu radiatsionno-ekologicheskomu zapovedniku*. Gomel': [publisher unknown]; 1998. p. 59–70. Russian.
17. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Otsenka zagryazneniya drevesiny i kory duba ^{137}Cs v zone otchuzhdeniya Chernobyl'skoi atomnoi elektrostantsii* [Assessment of oak wood and bark contamination by ^{137}Cs in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya*. 2022;4:33–45. Russian. DOI: 10.46646/2521-683X/2022-4-33-45.
18. Garbaruk DK, Uglyanets AV, Kudin MV. *Izmeneniya radiatsionnoi obstanovki v sosnyakh mshistykh v zone otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [Changes in the Radiation Situation in the Mossy Pine Forests of the Chernobyl NPP Exclusion Zone]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2021;61(5):524–535. Russian. DOI: 10.31857/S0869803121050064.
19. Perevolotskaya TV, Bulavik IM, Perevolotskii AN. *O vliyaniy podtopleniya na raspredelenie ^{137}Cs i ^{90}Sr v lesnom biogeotsenozе* [On the effect of partial flooding on ^{137}Cs and ^{90}Sr in forest biogeocenosis]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2009;49(3):291–301. Russian.
20. Bulko NI, Shabaleva MA, Mitin NV, Tolkacheva NV, Kozlov AK. *Osobennosti dlitel'nykh protsessov migratsii chernobyl'skogo ^{137}Cs v avtomorfnykh i gidromorfnykh pochvakh sosnykh fitotsenozov v dal'nei zone avarii na ChAES* [Features of long processes migration of chernobyl ^{137}Cs in automorphic and gidromorphic soils of pine phytocenoses in the distant zone accident to the NPP]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2015;75:391–404. Russian.
21. Bulko NI, Tolkacheva NV, Potapenko AM, Kozlov AK, Mashkov IA, Mitin NV, Shabaleva MA, Serenkova VA, Butkovets VV. *Povedenie ^{137}Cs v lesnykh pochvakh (faktory, dinamika, prognoz)* [Behavior of ^{137}Cs in forest soils (factors, dynamics, forecast)]. In: *Lesnye ekosistemy: sovremennye vyzovy, sostoyanie, produktivnost' i ustoychivost'* [Forest ecosystems: current challenges, status, productivity and sustainability]. Gomel': Institut lesa NAN Belarusi; 2020. p. 314–319. Russian.
22. Shcheglov AI, Tsvetnova OB. *Osnovnye zakonomernosti sezonnoi i mnogoletnei dinamiki nakopleniya ^{137}Cs i ^{90}Sr v drevesine* [Basic features of seasonal and multiyear dynamics of ^{137}Cs and ^{90}Sr in wood]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2004;44(1):113–117. Russian.
23. Zabrodskii VN, Uglyanets AV, Kalinin VN, Blinova NV, Kudin MV. *Vliyanie tipa lesa i tipa lesorastitel'nykh uslovii na perekhod ^{137}Cs i ^{90}Sr v drevesinu sosny v zone otchuzhdeniya ChAES po dannym radiatsionnogo obsledovaniya lesosek* [Influence of forest type and type of forest conditions on the transfer of ^{137}Cs and ^{90}Sr to pine wood in the Chernobyl NPP exclusion zone according to the results of the radiation examination of cutting areas]. In: *Sovremennye problemy radiobiologii – 2021* [Contemporary issues of radiobiology – 2021]. Minsk: IVTs Minfina; 2021. p. 68–72. Russian.
24. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Sovremennoe zagryaznenie stvolov duba ^{90}Sr v blizhnei zone radioaktivnykh vypadenii chernobyl'skogo sleda* [Oak trunks modern contamination with ^{90}Sr in the near zone of radioactive fallout of the chernobyl trace]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2023;83:282–293. Russian.
25. Bulko NI, Shabaleva MA, Mitin NV, Tolkacheva NV, Kozlov AK. *Dinamika dlitel'nykh protsessov postupleniya ^{137}Cs v komponenty fitomassy sosny obyknovЕННОй iz avtomorfnykh pochv v dal'nei zone avarii na ChAES* [Long-term dynamics of ^{137}Cs intake in components of scotch pine phytomass on automorphic soils in the far zone of chernobyl accident]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2016;76:371–379. Russian.

Статья поступила в редколлегию 23.06.2025.
Received by editorial board 23.06.2025.

РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ: ДИНАМИКА, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ

Н. Н. ЦЫБУЛЬКО¹⁾, М. Г. ГЕРМЕНЧУК¹⁾, В. В. ЖУРАВКОВ¹⁾, О. В. ДЮБАЙЛО²⁾,

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

²⁾Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного
загрязнения и мониторингу окружающей среды,
пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь

В исследовании приводятся результаты комплексного анализа динамики изменения радиационной обстановки на территории радиоактивного загрязнения в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Выполнен кратко- и долгосрочный прогноз ее изменения по составу и плотности радиоактивного загрязнения. Информационная основа работы – многолетние данные загрязнения территории республики ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238,239,240}\text{Pu}$, полученные в результате радиационного мониторинга. По расчетам, в ближайшие десятилетия (2036 г. и последующие) на территории, относящиеся к зонам проживания с периодическим радиационным контролем и с правом на отселение, будет приходиться более 95 % всей зоны радиоактивного загрязнения, где сконцентрировано 99,7 % населенных пунктов. В перспективе произойдет их сокращение более чем в 2,5 раза в зоне с правом на отселение и полное исключение населенных пунктов в зоне последующего отселения. Будет наблюдаться существенное и закономерное сокращение зон последующего отселения и с правом на отселение. По прогнозу, к 2036 г. из 44 загрязненных радионуклидами административных районов загрязнение территории 32 районов будет определяться ^{137}Cs , 3 районов – ^{137}Cs и ^{90}Sr и территории 9 районов – ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$. В 2046 г. территории 28 районов будут загрязнены ^{137}Cs , 2 районов – ^{137}Cs и ^{90}Sr , а также территории 9 районов – ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение; зоны загрязнения; динамика; прогноз; радионуклидный состав; ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; $^{238,239,240}\text{Pu}$.

Благодарность. Исследования выполнены по заданию 65.40 «Разработать схему зонирования территорий радиоактивного загрязнения, рекомендации по их правовому режиму и управлению на отдаленный период после катастрофы на Чернобыльской АЭС» Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 годы.

Образец цитирования:

Цыбулько НН, Герменчук МГ, Журавков ВВ, Дюбайло ОВ. Радиоактивное загрязнение территории Беларуси: динамика, современное состояние и долгосрочный прогноз. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;3:67–75.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-67-75>

For citation:

Tsybulka MM, Germenchuk MG, Zhuravkov VV, Dubaylo OV. Radioactive contamination of the territory of Belarus: dynamics, current state and long-term forecast. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;3:67–75. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-67-75>

Авторы:

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

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

Владислав Владимирович Журавков – кандидат биологических наук, доцент; заместитель директора по учебной работе.

Олег Васильевич Дюбайло – начальник службы радиационного мониторинга Белгидромета.

Authors:

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

nik.nik1966@tut.by

Maria G. Germenchuk, PhD (engineering), docent; deputy director for research.

margermen@gmail.com

Vladislav V. Zhuravkov, PhD (biology), docent; deputy director for education.

zhvl@mail.ru

Oleg V. Dubailo, head of the radiation monitoring service of Belhydromet.
dov@hmc.by

RADIOACTIVE CONTAMINATION OF THE TERRITORY OF BELARUS: DYNAMICS, CURRENT STATE AND LONG-TERM FORECAS

M. M. TSYBULKA^a, M. G. GERMENCHUK^a, V. V. ZHURAVKOV^a, O. V. DUBAYLO^b

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

^bRepublican Center for Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring,
110 Niezaležnasci Avenue, Minsk 220114, Belarus
Corresponding author: M. M. Tsybulka (nik.nik1966@tut.by)

The article presents the results of a comprehensive analysis of the dynamics of changes in radiation activity in the territory of radioactive contamination as a result of the Chernobyl accident. A short- and long-term forecast of its changes in the composition and density of radioactive contamination was made. Information works were long-term data on the contamination of the territory of the republic with ^{137}Cs , ^{90}Sr and $^{238,239,240}\text{Pu}$, obtained as a result of radiation exposure. According to calculations, in the direction of the direction (2036 and others), more than 95 % of the entire territory of radiation contamination will occur in the territory associated with residential zones with periodic radiation monitoring and the right to resettlement. These territories contain about 99.7 % of populated areas. In the future, it is necessary to reduce by more than 2.5 times the number of populated areas in the zone with the right to resettlement and complete transfer of populated areas to the zone of subsequent resettlement. Observe precautions and comply with the rules of resettlement located below and to the right of resettlement. According to the forecast, by 2036, out of 44 districts contaminated with radionuclides, the territory of 32 districts will be contaminated with ^{137}Cs , 3 districts – with ^{137}Cs and ^{90}Sr , and the territory of 9 districts – with ^{137}Cs , ^{90}Sr and $^{238-240}\text{Pu}$. In 2046, the territory of 28 districts will be contaminated with ^{137}Cs , 2 districts – with ^{137}Cs and ^{90}Sr , and the territory of 9 districts – with ^{137}Cs , ^{90}Sr and $^{238-240}\text{Pu}$.

Keywords: radioactive contamination; pollution zones; dynamics; forecast; radionuclide composition; ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; $^{238,239,240}\text{Pu}$.

Acknowledgments. The research was carried out on assignment 65.40 «To develop a zoning scheme for radioactive contamination areas, recommendations on their legal regime and management for the long-term period after the Chernobyl disaster» of the State Program for overcoming the consequences of the Chernobyl disaster for 2021–2025.

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС признана одной из наиболее тяжелых радиационных катастроф за всю историю развития ядерной энергетики. По Международной шкале ядерных событий (INES, ИНЕС) она отнесена к максимальному седьмому уровню [1]. По данным Доклада НКДАР (Научный комитет ООН по действию атомной радиации), активная зона реактора на момент аварии содержала радиоактивные продукты деления и трансурановые элементы (около 200 радиоизотопов) с разными периодами полураспада: от нескольких часов и менее до сотен тысяч лет [2]. Выброс большого количества радиоактивных веществ привел к масштабному загрязнению территории. В странах бывшего СССР (Беларуси, России и Украине) площади с плотностью загрязнения ^{137}Cs выше 37 кБк/м² составили около 150 тыс. км². Высокие уровни загрязнения определили необходимость эвакуации населения из населенных пунктов, расположенных в Беларуси на площади 6,2 тыс. км², в России – 0,19 тыс. км², в Украине – 4,2 тыс. км², включая 2,0 тыс. км² за пределами 30-километровой зоны отчуждения, а также прекращения или ограничения хозяйственной деятельности [3; 4].

В плане облучения населения наиболее значимыми радионуклидами оказались ^{131}I , ^{137}Cs , ^{90}Sr и изотопы плутония ($^{238,239,240,241}\text{Pu}$). Радиологическая значимость выброса короткоживущего радионуклида ^{131}I обусловлена его высокой активностью и избирательной концентрацией в щитовидной железе, обладающей небольшими размерами. Из долгоживущих радионуклидов наибольшей значимостью обладают ^{137}Cs , ^{90}Sr . В первые годы после аварии значимым было также облучение ^{134}Cs .

Особенность формирования радиоактивного загрязнения территории состояла в неоднородности вследствие фракционирования радиоактивных выпадений и влияния погодных условий. В первый период после аварии радиационная обстановка определялась коротко- и среднеживущими радионуклидами. Специфической особенностью являлось наличие топливных частиц, выпавших в основном в пределах 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС. В настоящее время радиационную обстановку определяют ^{137}Cs , ^{90}Sr и группа трансурановых радионуклидов $^{238,239,240,241}\text{Pu}$, ^{241}Am , негативное воздействие которых будет продолжаться в течение длительного послеварийного периода.

Первые количественные оценки выброшенного в результате аварии и выпавшего на территории бывшего СССР ^{137}Cs сделаны на основе воздушных радиометрических измерений. По первичным расчетам

выпало около 40 ПБк ($1 \cdot 10^6$ Кюри). Оценки выбросов постоянно уточнялись и в настоящее время общий объем выпавшего на территорию бывшего СССР ^{137}Cs примерно в два раза больше первоначальных оценок [5].

Цель работы: провести комплексный анализ динамики изменения радиационной обстановки на территории радиоактивного загрязнения в результате аварии на Чернобыльской АЭС, дать кратко- и долгосрочный прогноз его изменения по составу и плотности.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования выступали территории Беларуси, загрязненные ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238,239,240}\text{Pu}$, по зонам радиоактивного загрязнения и административным районам: 1) зона проживания с периодическим радиационным контролем; 2) зона с правом на отселение; 3) зона последующего отселения.

Предмет исследования: динамика и прогноз изменения радиационной обстановки на территории Беларуси; динамика и прогноз изменения площадей зон радиоактивного загрязнения и распределения населенных пунктов по зонам радиоактивного загрязнения в разные послеаварийные периоды; прогнозная оценка распределения территорий населенных пунктов по радионуклидному составу.

Информационной основой работы являлись многолетние данные загрязнения территории республики ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238,239,240}\text{Pu}$, полученные в результате радиационного мониторинга («База данных RECONT» Государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» – далее Белгидромет).

Результаты исследования и их обсуждение

Радиоактивное загрязнение природной среды является наиболее значимой по площади распространения экологической проблемой Беларуси. В то же время площадь территории радиоактивного загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr вследствие их естественного распада постепенно сокращается. Так, площадь загрязнения ^{137}Cs с плотностью 37 кБк/м² и выше (1 Ки/км² и выше) уменьшилась с 1986 г. с 46,6 тыс. км² до 25,5 тыс. км² (в 1,8 раза). Площадь загрязнения ^{90}Sr с плотностью 5,55 кБк/м² и выше (0,15 Ки/км² и выше) сократилась с 21,1 тыс. км² до 11,8 тыс. км² (в 1,9 раза) (рис. 1).

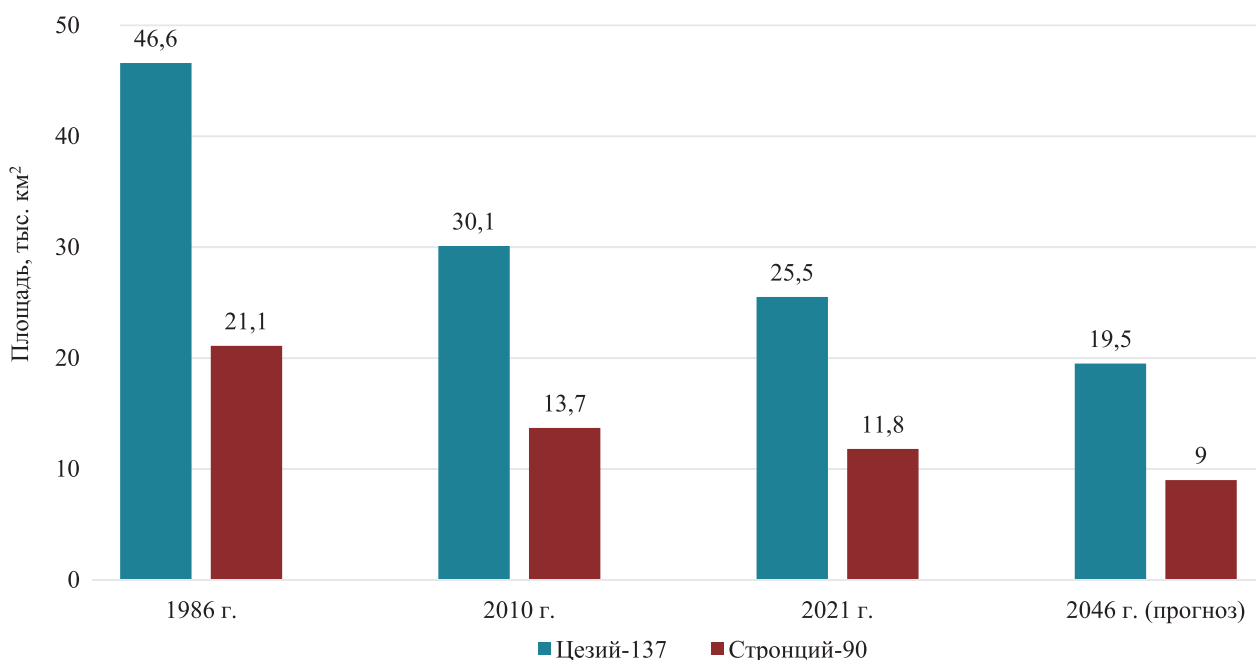


Рис. 1. Динамика сокращения площади территории радиоактивного загрязнения Беларуси ^{137}Cs и ^{90}Sr

Fig. 1. Dynamics of decrease of the area of territory of radioactive contamination of Belarus with ^{137}Cs and ^{90}Sr

Учитывая динамику самоочищения почвы, выполнен прогноз площади территории радиоактивного загрязнения республики с контролируруемыми плотностями загрязнения ^{137}Cs 37 кБк/м² и выше и ^{90}Sr 5,55 кБк/м² и выше. Так, по состоянию на 2046 г. площадь территории, загрязненной ^{137}Cs , составит 19,5 тыс. км², а площадь территории, загрязненной ^{90}Sr , – 9,0 тыс. км², что составляет 9,6 и 4,4 % от общей площади суши республики соответственно.

Площадь территории, загрязненной $^{238,239,240}\text{Pu}$ от 0,37 кБк/м² (от 0,01 Ки/км²) и выше за пределами зоны эвакуации (отчуждения), составляет 2,69 тыс. км² или 1,3 % площади территории республики.

Площадь зоны эвакуации (отчуждения) – территории, с которой в 1986 г. эвакуировано население (30-километровая зона и территория, с которой проведено дополнительное отселение населения в связи с плотностью загрязнения почв ^{90}Sr выше 111 кБк/м² (выше 3,0 Ки/км²) и $^{238,239,240}\text{Pu}$ выше 3,7 кБк/м² (от 0,1 Ки/км²)), составляет 1,7 тыс. км².

В Брестской обл. за период с 1986 по 2021 г. площадь территории с уровнем загрязнения ^{137}Cs от 37 кБк/м² в связи с его естественным распадом уменьшилась в 3,4 раза и по состоянию на 01.01.2021 г. составляла 1,35 тыс. км² (4,1% общей площади территории области). Площадь территории с уровнем загрязнения ^{137}Cs 37–185 кБк/м² составляет 1,31 тыс. км², с плотностью загрязнения 185–555 кБк/м² – 0,04 тыс. км². Загрязнение ^{90}Sr с уровнями от 5,55 кБк/м² (0,15 Ки/км²) и $^{238,239,240}\text{Pu}$ с уровнями от 0,37 кБк/м² на территории Брестской обл. не зарегистрировано (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Площадь загрязнения территории Беларуси ^{137}Cs по областям

T a b l e 1

The area of contamination of the territory of Belarus with ^{137}Cs by regions

Область	Загрязнено ^{137}Cs			В том числе тыс. км ² с плотностью загрязнения, кБк/м ² (Ки/км ²)			
	тыс. км ²	в % к общей площади		37–185 (1–5)	185–555 (5–15)	555–1480 (15–40)	>1480 (>40)
		Беларуси	области				
Брестская	1,35	0,65	4,1	1,31	0,04	–	–
Гомельская	16,44	7,9	40,7	10,88	4,03	1,27	0,26
Гродненская	0,35	0,17	1,4	0,35	<0,01	–	–
Минская	0,72	0,35	1,8	0,72	<0,01	–	–
Могилевская	6,63	3,2	22,8	4,81	1,40	0,42	<0,01
Республика	25,49	12,3	–	18,07	5,47	1,69	0,26

В Гомельской обл. за период с 1986 по 2021 г. площадь территории с уровнем загрязнения ^{137}Cs от 37 кБк/м² сократилась в 1,7 раза и по состоянию на 01.01. 2021 г. составляла 16,44 тыс. км² (40,7 % общей площади территории области). Площадь территории с уровнем загрязнения ^{137}Cs 37–185 кБк/м² составляет 10,88 тыс. км², с плотностью загрязнения 185–555 кБк/м² – 4,03 тыс. км², с плотностью загрязнения 555–1480 кБк/м² – 1,27 тыс. км² и с плотностью загрязнения >1480 кБк/м² – 0,26 тыс. км². Площадь территории, загрязненной $^{238,239,240}\text{Pu}$ от 0,37 кБк/м² и выше за пределами зоны эвакуации (отчуждения), составляет 2,69 тыс. км².

В Гродненской обл. за период с 1986 по 2021 г. площадь территории с уровнем загрязнения ^{137}Cs от 37 кБк/м² снизилась в 5,1 раза и по состоянию на 01.01. 2021 г. составляла 0,35 тыс. км² (1,4 % от общей площади территории области). Загрязнение ^{90}Sr с уровнями от 5,55 кБк/м² и $^{238,239,240}\text{Pu}$ с уровнями от 0,37 кБк/м² на территории Гродненской обл. не зарегистрировано.

В Минской обл. за период с 1986 по 2021 г. площадь территории с уровнем загрязнения ^{137}Cs от 37 кБк/м² в связи с его естественным распадом уменьшилась в 3,3 раза и на 01.01. 2021 г. составляла 0,72 тыс. км² (1,8 % от общей площади территории области). Загрязнение ^{90}Sr и $^{238,239,240}\text{Pu}$ на территории Минской обл. не зарегистрировано.

В Могилевской обл. за период с 1986 по 2021 г. площадь территории с уровнем загрязнения ^{137}Cs от 37 кБк/м² уменьшилась в 1,7 раза и на 01.01.2021 г. составляла 6,63 тыс. км² (22, 8 % от общей площади территории области). Площадь территории с уровнем загрязнения ^{137}Cs 37–185 кБк/м² составляет 4,81 тыс. км², с плотностью загрязнения 185–555 кБк/м² – 1,40 тыс. км², с плотностью загрязнения 555–1480 кБк/м² – 0,42 тыс. км² и с плотностью загрязнения >1480 кБк/м² – < 0,01 тыс. км².

Законом Республики Беларусь «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС» установлено зонирование, то есть отнесение территорий, населенных пунктов и объектов к одной из зон радиоактивного загрязнения. Решение об отнесении к определенной зоне принимается в зависимости от средней годовой эффективной дозы облучения населения (СГЭД) и превышения порогового значения по одной из величин плотности загрязнения

^{137}Cs , ^{90}Sr или $^{238,239,240}\text{Pu}$. В зависимости от плотности загрязнения почв радионуклидами и (или) СГЭД выделяются следующие зоны радиоактивного загрязнения [6]:

– зона эвакуации (отчуждения) – территория вокруг Чернобыльской АЭС, с которой в 1986 г. было эвакуировано население (30-километровая зона и территория, с которой проведено дополнительное отселение населения в связи с плотностью загрязнения почв ^{90}Sr более 111 кБк/км² (3 Ки/км²) и $^{238,239,240}\text{Pu}$ более 3,7 кБк/км² (0,1 Ки/км²));

– зона первоочередного отселения – территория с плотностью загрязнения почв ^{137}Cs от 1480 кБк/км² (40 Ки/км²), либо ^{90}Sr , или $^{238,239,240}\text{Pu}$ соответственно 111, 3,7 кБк/км² (3, 0,1 Ки/км²) и более;

– зона последующего отселения – территория с плотностью загрязнения почв ^{137}Cs 555–1480 кБк/км² (15–40 Ки/км²), либо ^{90}Sr 74–111 кБк/км² (2–3 Ки/км²), или $^{238,239,240}\text{Pu}$ 1,85–3,7 кБк/км² (0,05–0,1 Ки/км²), на которой СГЭД может превысить (над уровнем естественного и техногенного фона) 5 мЗв, и другие территории, на которых СГЭД может превысить 5 мЗв;

– зона с правом на отселение – территория с плотностью загрязнения почв ^{137}Cs 185–555 кБк/км² (5–15 Ки/км²), либо ^{90}Sr 18,5–74 кБк/км² (0,5–2 Ки/км²), или $^{238,239,240}\text{Pu}$ 0,74–1,85 кБк/км² (0,02–0,05 Ки/км²), на которой СГЭД может превысить (над уровнем естественного и техногенного фона) 1 мЗв, а также другие территории, на которых СГЭД может превысить 1 мЗв;

– зона проживания с периодическим радиационным контролем – территория с плотностью загрязнения почв ^{137}Cs 37–185 кБк/км² (1–5 Ки/км²), либо ^{90}Sr 5,55–18,5 кБк/км² (0,15–0,5 Ки/км²), или $^{238,239,240}\text{Pu}$ 0,37–0,74 кБк/км² (0,01–0,02 Ки/км²), на которой СГЭД не должна превышать (над уровнем естественного и техногенного фона) 1 мЗв.

В Беларуси в результате аварии на Чернобыльской АЭС на территориях радиоактивного загрязнения оказалось 3679 населенных пунктов, в которых проживало 2,2 млн человек. В 1986 г. из 107 населенных пунктов Гомельской обл. (Брагинского, Наровлянского, Хойникского р-нов) с высокими уровнями загрязнения эвакуировано около 24 тыс. жителей. В последующем переселено на незагрязненные территории около 114 тыс. человек. Всего прекратило существование 479 населенных пунктов [6].

После аварии на Чернобыльской АЭС из более чем 46 тыс. км² территории радиоактивного загрязнения, зона проживания с периодическим радиационным контролем (зона 1) занимала 29 тыс. км² (14,8 %), зона с правом на отселение (зона 2) – 10,7 тыс. км² (5,3 %), зона последующего отселения (зона 3) – 4,8 тыс. км² (2,4 %), зона первоочередного отселения (зона 4) – 2,4 тыс. км² (1,2 %). По состоянию на 2021 г. перечисленные зоны радиоактивного загрязнения составили соответственно 8,7 %, 2,6, 0,8 и 0,2 %, а по прогнозу на 2046 г. процентные площади их составят 8,1 %, 1,2, 0,2 и 0,1 % (рис. 2).

Если принять общую площадь территории радиоактивного загрязнения за 100 %, то на 1986 г. зона проживания с периодическим радиационным контролем занимала 62,4 %, зона с правом на отселение – 22,4 %, зона последующего отселения – 10,1 %, зона первоочередного отселения – 5,1 %. По состоянию на 2021 г. (спустя 35 лет после аварии), зона проживания с периодическим радиационным контролем составила 70,7 %, зона с правом на отселение – 21,1 %, зона последующего отселения – 3,7 %, зона первоочередного отселения – 0,9 %. По прогнозной оценке, к 2046 г. (спустя 60 лет после аварии) на зону проживания с периодическим радиационным контролем будет приходиться 84,4 %, на зону с правом на отселение – 12,5 %, а на зоны последующего и первоочередного отселения – всего 3,1 %.

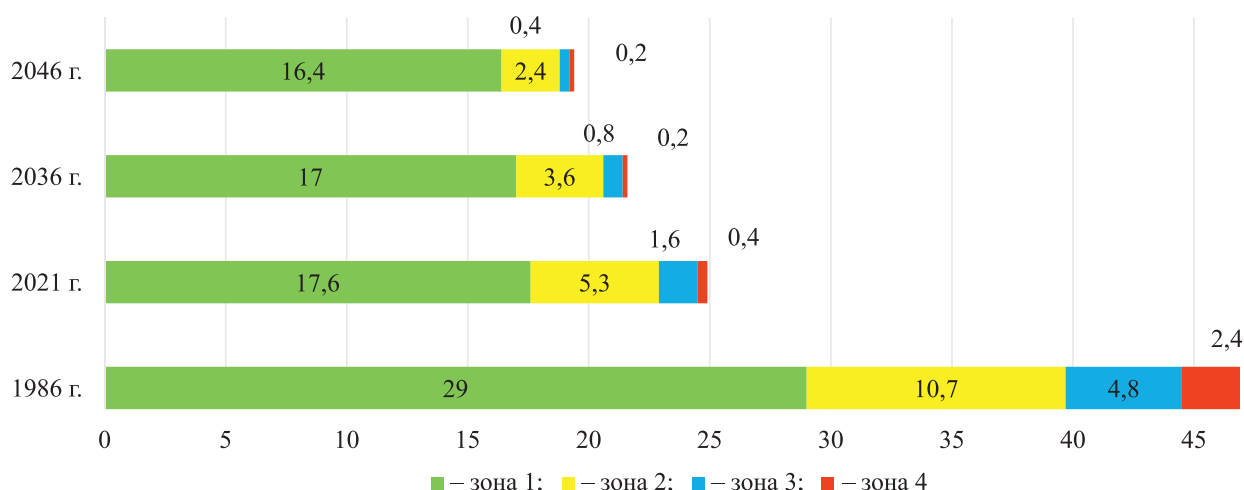


Рис. 2. Динамика распределения площадей по зонам радиоактивного загрязнения (в тыс. км²)

Fig. 2. Dynamics of distribution of areas by radioactive contamination zones (in thousands km²)

В результате естественного распада ^{137}Cs и ^{90}Sr , определяющих радиационную обстановку, за 39-летний период из зон радиоактивного загрязнения выведено 1810 населенных пунктов с их ареалами, или 49 % от их первоначального количества. Прогноз динамики количества населенных пунктов, находящихся на территории радиоактивного загрязнения, на основе базы данных радиационного мониторинга RECONT Белгидромета показал, что по состоянию на 2021 г. численность их составляла 2022 населенных пункта. К 2031 г. количество населенных пунктов на территории радиоактивного загрязнения сократиться (согласно прогнозу) до 1552, а к 2046 г. – до 1140 (рис. 3).

За длительный послеаварийный период существенно изменилась структура распределения населенных пунктов по зонам радиоактивного загрязнения. Так, если в 1996 г. в зоне с периодическим радиационным контролем находилось 60 % населенных пунктов, в зоне правом на отселение – 37 % и в зоне последующего отселения – 3 %, то в соответствии с Перечнем населенных пунктов и объектов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 08.02.2021 № 75, соответственно 86,4 %, 13,4 и 0,2 %.

По состоянию на 2024 г. из 1815 населенных пунктов, находящихся на территории радиоактивного загрязнения, 88 % их расположено в зоне с периодическим радиационным контролем, 11 % – в зоне с правом на отселение и 0,2 % в зоне последующего отселения.



Рис. 3. Динамика распределения населенных пунктов по зонам радиоактивного загрязнения в разные послеаварийные периоды

Fig. 3. Dynamics of distribution of settlements in zones of radioactive contamination in different post-accident periods

По прогнозным оценкам, к 2036 г. в зоне с периодическим радиационным контролем будет находиться 1322 населенных пункта (92 % от их общего количества), в зоне с правом на отселение – 107 (7 %) и в зоне последующего отселения – 2 населенных пункта (0,1%). Прогнозируется, что на 2046 г. в зоне с периодическим радиационным контролем будет находиться 1074 населенных пункта (94 % от их общего количества), в зоне с правом на отселение – 64 (6 %) и в зоне последующего отселения – 2 населенных пункта.

Из 47 районов, подверженных радиоактивному загрязнению, в 5 районах имеется по одному населенному пункту, расположенному в зоне последующего отселения – Буда-Кошелевский, Добрушский и Хойникский р-ны Гомельской обл., Краснопольский и Чериковский р-ны Могилевской обл. В 22 районах часть населенных пунктов расположена в зоне с правом на отселение.

Анализ данных радиационного мониторинга показал, что по состоянию на 2024 г. из 46 загрязненных радионуклидами административных районов, территории 32 районов загрязнены только ^{137}Cs , территории 5 районов – ^{137}Cs и ^{90}Sr и территории 9 районов – ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$. По прогнозу в 2036 г., из 44 загрязненных радионуклидами административных районов, территории 32 района будут загрязнены ^{137}Cs , 3 районов – ^{137}Cs и ^{90}Sr и территории 9 районов – ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$. В 2046 г. территории 28 районов будут загрязнены ^{137}Cs , 2 района – ^{137}Cs и ^{90}Sr и территории 9 районов – ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$ (рис. 4).

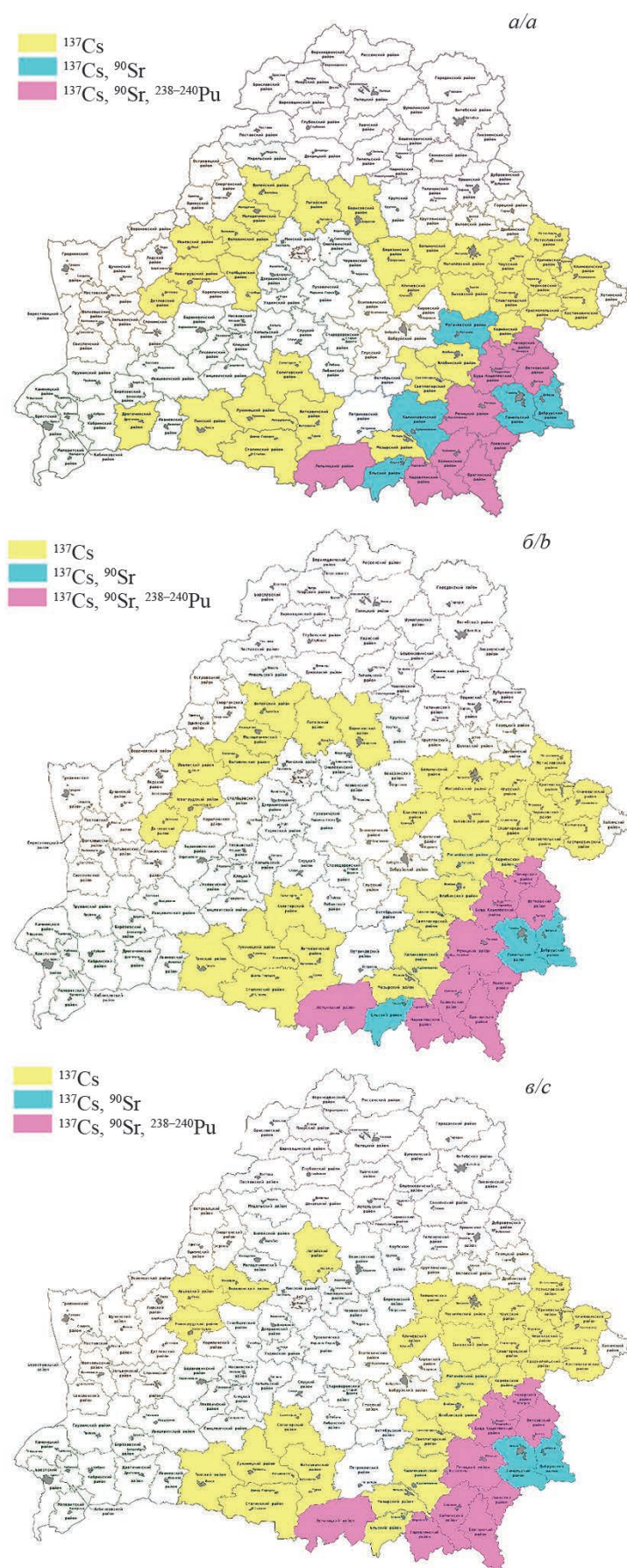


Рис. 4. Картограммы загрязнения административных районов по радионуклидному составу: а) 2024 г.; б) 2036 г.; в) 2046 г.

Fig. 4. Cartograms of pollution of administrative districts by radionuclide composition: а) 2024; б) 2036; в) 2046

По прогнозу на 2031 г., из 1552 населенных пунктов, находящихся на территории радиоактивного загрязнения, 1328 будет загрязнено ^{137}Cs , 59 – ^{90}Sr , 106 – ^{137}Cs и ^{90}Sr , 13 – $^{238-240}\text{Pu}$, 12 – ^{137}Cs и $^{238-240}\text{Pu}$, 6 – ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$ и 28 – ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$. В последующие периоды будет наблюдаться уменьшение количества населенных пунктов, загрязненных ^{137}Cs и ^{90}Sr , и увеличение количества населенных пунктов, которые будут «зонироваться» по изотопам плутония ($^{238-240}\text{Pu}$). Так, к 2046 г. из общей численности (по прогнозу 1140) населенных пунктов на территории радиоактивного загрязнения их численность составит 983 и будет загрязнено только ^{137}Cs , 14 – ^{90}Sr , 46 – ^{137}Cs и ^{90}Sr , 22 – $^{238-240}\text{Pu}$, 16 – ^{137}Cs и $^{238-240}\text{Pu}$, 13 – ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$ и 46 – ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$ (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Распределение населенных пунктов на территории радиоактивного загрязнения по радионуклидному составу

T a b l e 2

Distribution of settlements in the territory of radioactive contamination by radionuclide composition

Радионуклиды	Количество населенных пунктов по годам			
	2024 г.	2031 г.	2036 г.	2046 г.
Зона проживания с периодическим радиационным контролем				
^{137}Cs	1375	1221	1159	947
^{90}Sr	58	50	35	12
$^{137}\text{Cs}, ^{90}\text{Sr}$	135	102	72	46
$^{238-240}\text{Pu}$	—	1	1	2
$^{137}\text{Cs}, ^{238-240}\text{Pu}$	1	2	3	9
$^{90}\text{Sr}, ^{238-240}\text{Pu}$	1	2	2	12
$^{137}\text{Cs}, ^{90}\text{Sr}, ^{238-240}\text{Pu}$	40	25	50	46
Всего	1610	1403	1322	1074
Зона с правом на отселение				
^{137}Cs	107	106	78	36
^{90}Sr	6	9	2	2
$^{137}\text{Cs}, ^{90}\text{Sr}$	32	4	2	—
$^{238-240}\text{Pu}$	5	10	10	18
$^{137}\text{Cs}, ^{238-240}\text{Pu}$	5	10	10	7
$^{90}\text{Sr}, ^{238-240}\text{Pu}$	3	4	4	1
$^{137}\text{Cs}, ^{90}\text{Sr}, ^{238-240}\text{Pu}$	43	3	1	—
Всего	201	146	107	64
Зона последующего отселения				
^{137}Cs	2	1	—	—
^{90}Sr	—	—	—	—
$^{137}\text{Cs}, ^{90}\text{Sr}$	—	—	—	—
$^{238-240}\text{Pu}$	2	2	2	2
$^{137}\text{Cs}, ^{238-240}\text{Pu}$	—	—	—	—
$^{90}\text{Sr}, ^{238-240}\text{Pu}$	—	—	—	—
$^{137}\text{Cs}, ^{90}\text{Sr}, ^{238-240}\text{Pu}$	—	—	—	—
Всего	4	3	2	2
Итого	1815	1552	1431	1140

Заключение

В ближайшие десятилетия (2036 г. и последующие) на территории, относящиеся к зонам проживания с периодическим радиационным контролем и с правом на отселение, будет приходиться более 95 % всей территории радиоактивного загрязнения. На них сконцентрировано 99,7 % населенных пунктов.

В перспективе произойдет сокращение более чем в 2,5 раза количества населенных пунктов в зоне с правом на отселение и полное исключение населенных пунктов в зоне последующего отселения. Будет наблюдаться существенное и закономерное сокращение зон последующего отселения и с правом на отселение.

По прогнозу к 2036 г., из 44 загрязненных радионуклидами административных районов загрязнение территории 32 районов будет определяться ^{137}Cs , 3 района – ^{137}Cs и ^{90}Sr и территории 9 районов – ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$. В 2046 г. территории 28 районов будут загрязнены ^{137}Cs , 2 района – ^{137}Cs и ^{90}Sr и территории 9 районов – ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{238-240}\text{Pu}$.

Библиографические ссылки

1. INES. Руководство для пользователей международной шкалы ядерных и радиологических событий. Вена: МАГАТЭ; 2010. 235 с.
2. Последствия облучения для здоровья человека в результате черновыльской аварии. Научное приложение D к докладу НКДАР Генеральной ассамблеи ООН 2008 года. ООН. Нью-Йорк: [б. и.]; 2012. 173 с.
3. Израэль ЮА, редактор. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. Ленинград: Гидрометеиздат; 1990. 296 с.
4. Санжарова НИ, Фесенко СВ, редакторы. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий. Москва: РАН; 2018. 278 с.
5. Экологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС и их преодоление. Двадцатилетний опыт: доклад экспертной группы «Экология» Чернобыльского форума. Вена: МАГАТЭ; 2008. 180 с.
6. 35 лет после черновыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления ее последствий: национальный доклад Республики Беларусь. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Минск: ИВЦ Минфина; 2020. 152 с.

Reference

1. INES. *Rukovodstvo dlya pol'zovatelej mezhdunarodnoj shkaly yadernyh i radiologicheskikh sobytij* [INES. User Guide for the International Scale of Nuclear and Radiological Events]. Vienna: IAEA; 2010. 235 p.
2. *Posledstviya oblucheniya dlya zdorov'ya cheloveka v rezul'tate chernobyl'skoj аварии. Nauchnoe prilozhenie D k dokladu NKДАР General'noj assamblee OON 2008 goda* [Effects of radiation on human health as a result of the Chernobyl accident. Scientific Appendix D to the 2008 NCDAR Report to the UN General Assembly]. UN. New York: [publisher unknown]; 2012. 173 p.
3. Israel YuA, editor. *Chernobyl': radioaktivnoe zagryaznenie prirodnyh sred* [Chernobyl: radioactive pollution of natural environments. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1990. 296 p.
4. Sanzharova NI, Fesenko SV, editors. *Radioekologicheskie posledstviya аварии na Chernobyl'skoj AES: biologicheskie efekty, migraciya, rehabilitaciya zagryaznennyh territorij* [Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas]. Moscow: RAS; 2018. 278 p.
5. *Ekologicheskie posledstviya аварии na CHernobyl'skoj AES i ih preodolenie. Dvadcatiletnij opyt: doklad ekspertnoj grupy «Ekologiya» CHernobyl'skogo foruma* [Environmental consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant and their overcoming: twenty years of experience: report of the expert group «Ecology» of the Chernobyl forum]. Vienna: IAEA; 2008. 180 p.
6. *35 let posle chernobyl'skoj katastrofy: itogi i perspektivy preodoleniya ee posledstvij: nacional'nyj doklad Respubliki Belarus* [35 years after the Chernobyl disaster: results and prospects of overcoming its consequences: National Report of the Republic of Belarus] Chernobyl Disaster Management Department of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus. Minsk: IVC of the Ministry of Finance; 2020. 152 p.

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

УДК 577.15:615.9:612.017.1

КОНЦЕНТРАЦИОННО-ЗАВИСИМОЕ ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ мРНК *CYP1A1* И *CYP1B1* ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФЕНОБАРБИТАЛА В ЛИМФОЦИТАХ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА

М. С. И. ГАИТ¹⁾, А. Г. СЫСА¹⁾, Е. П. ЖИВИЦКАЯ¹⁾

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

Ферменты цитохрома P450 *CYP1A1* и *CYP1B1*, регулируемые через рецепторы к ароматическим углеводородам (AhR), играют важную роль в метаболизме ксенобиотиков-экоотоксикантов и иммуноотоксичности. Хотя фенотбарбитал является известным индуктором ферментов *CYP450*, однако его концентрационно-зависимые эффекты в лимфоцитах человека остаются малоизученными. Изолированные лимфоциты периферической крови человека (ЛПК) здоровых взрослых доноров ($n = 20$) подвергали воздействию фенотбарбитала (50 мкМ или 100 мкМ) в течение 5 часов. Уровень мРНК *CYP1A1/1B1* определяли методом количественной ПЦР (референсный ген *GAPDH*; эффективность 90–110 %). Выживаемость клеток оценивали с помощью флуоресцентного красителя CFSE через 72 ч культивирования. Данные представлены в виде среднего значения $\pm$ – стандартная ошибка среднего; групповые различия проверяли с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с использованием апостериорного критерия Тьюки. Взаимосвязи определяли с помощью коэффициента корреляции Пирсона. Фенотбарбитал в концентрации 50 мкМ увеличивал уровень мРНК *CYP1A1* и *CYP1B1* (в $3,42 \pm 0,8$ и $2,61 \pm 0,5$ раза по сравнению с контролем; в обоих случаях $p < 0,01$),

Образец цитирования:

Гаит МСИ, Сыса АГ, Живицкая ЕП. Концентрационно-зависимое повышение уровня мРНК *CYP1A1* и *CYP1B1* под действием фенотбарбитала в лимфоцитах периферической крови человека. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;3:76–81 (на англ.).
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-76-81>

For citation:

Ghaith MSI, Sysa AG, Zhyvtskaya EP. Concentration-dependent upregulation of *CYP1A1* and *CYP1B1* mRNA by phenobarbital in human peripheral blood lymphocytes. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;3:76–81.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-76-81>

Авторы:

Алексей Григорьевич Сыса – кандидат химических наук, доцент; доцент кафедры экологической химии и биохимии.
Мготир Гаит Саджид Ибрагим – аспирант кафедры экологической химии и биохимии.
Елена Петровна Живицкая – старший преподаватель кафедры экологической медицины и радиобиологии.

Authors:

Aliaksei G. Sysa, PhD (chemistry), docent; associate professor at the department of environmental chemistry and biochemistry.
aliaksei.sysa@iseu.by
Mgotir Ghaith Sajid Ibrahim, postgraduate student at the department of environmental chemistry and biochemistry.
shiva.samma97@gmail.com
Alena P. Zhyvitskaya, senior lecturer at the department of environmental medicine and radiobiology
alena.zhyvitskaya@gmail.com

тогда как 100 мкМ концентрация вызывала меньшую индукцию (в $1,25 \pm 0,2$ и $1,21 \pm 0,1$ раза; в обоих случаях $p < 0,05$ по сравнению с контролем). Выживаемость клеток уменьшилась до $62 \pm 7,1$ % от контроля при 50 мкМ ($p < 0,01$) и составила $88 \pm 4,3$ % при 100 мкМ ($p > 0,05$ по сравнению с контролем; $p < 0,01$ по сравнению с 50 мкМ). Индукция *CYP1A1/1B1* отрицательно коррелировала с показателями CFSE ($r = -0,85$ и $-0,82$; в обоих случаях $p < 0,001$). Показано, что фенобарбитал связан с дифференциальной активацией мРНК *CYP1A1/CYP1B1* и снижением выживаемости клеток в исследованных концентрациях. Полученные предварительные результаты указывают на потенциальные эффекты, зависящие от концентрации, что требует дальнейших структурно-функциональных исследований.

Ключевые слова: ферменты цитохрома P450; *CYP1A1*; *CYP1B1*; фенобарбитал; лимфоциты периферической крови; количественная ПЦР; иммунотоксичность; метаболизм ксенобиотиков.

CONCENTRATION-DEPENDENT UPREGULATION OF *CYP1A1* AND *CYP1B1* MRNA BY PHENOBARBITAL IN HUMAN PERIPHERAL BLOOD LYMPHOCYTES

M. S. I. GHAITH^a, A. G. SYSA^a, E. P. ZHYVTSKAYA^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: A. G. Sysa (aliaksei.sysa@iseu.by)

Cytochrome P450 enzymes *CYP1A1* and *CYP1B1*, regulated by the aryl hydrocarbon receptor (AhR) pathway, play a critical role in xenobiotic metabolism and immunotoxicity. While phenobarbital is a known inducer of CYP450 enzymes, its concentration-dependent effects in human lymphocytes remain poorly characterized. Isolated human peripheral blood lymphocytes (PBLs) from healthy adult donors ($n = 20$) were exposed to phenobarbital (50 μ M or 100 μ M) for 5 h. *CYP1A1/1B1* mRNA was quantified by qPCR (*GAPDH* reference; efficiency 90–110 %). A CFSE-based assay was used to assess cell viability at 72 h. Data are mean $\pm$ SEM; group differences were tested by one-way ANOVA with Tukey's post hoc test; correlations by Pearson's r . Phenobarbital at 50 μ M increased *CYP1A1* and *CYP1B1* mRNA (3.42 ± 0.8 - and 2.61 ± 0.5 -fold vs control; both $p < 0.01$), whereas 100 μ M elicited smaller induction (1.25 ± 0.2 - and 1.21 ± 0.1 -fold; both $p < 0.05$ vs control). The CFSE readout was reduced to 62 ± 7.1 % of control at 50 μ M ($p < 0.01$) and was 88 ± 4.3 % at 100 μ M (not significant vs control; $p < 0.01$ vs 50 μ M). Induction of *CYP1A1/1B1* negatively correlated with the CFSE readout ($r = -0.85$ and -0.82 ; both $p < 0.001$). Phenobarbital was associated with differential *CYP1A1/CYP1B1* mRNA upregulation and reduced proliferation at the tested concentrations. These preliminary findings suggest potential concentration-related effects, warranting further mechanistic studies.

Keywords: cytochrome P450; *CYP1A1*; *CYP1B1*; phenobarbital; human peripheral blood lymphocytes; qPCR; immunotoxicity; xenobiotic metabolism.

Introduction

Cytochrome P450 (CYP) enzymes represent a superfamily of heme-containing monooxygenases that are essential for the biotransformation of endogenous compounds, pharmaceuticals, and environmental xenobiotics. Among these, *CYP1A1* and *CYP1B1* are particularly noteworthy for their dual roles in human health and ecological toxicology. On one hand, they facilitate the detoxification of harmful substances by catalyzing oxidative reactions that render lipophilic compounds more water-soluble and excretable. On the other hand, they can bioactivate procarcinogens into reactive metabolites, thereby contributing to mutagenesis, carcinogenesis, and other toxicological outcomes. This paradoxical functionality positions CYP1 enzymes as critical mediators in the interface between environmental exposures and cellular homeostasis.

The regulation of *CYP1A1* and *CYP1B1* is predominantly governed by the aryl hydrocarbon receptor (AhR) pathway, a ligand-activated transcription factor that responds to a wide array of environmental contaminants. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), such as benzo[a]pyrene (BaP) and 3-methylcholanthrene (MC), are prototypical AhR agonists. These compounds are ubiquitous persistent organic pollutants (POPs) originating from diverse sources, including incomplete combustion of fossil fuels, wildfires, industrial processes, vehicle exhaust, and tobacco smoke. PAHs' persistence in the environment – due to their chemical stability and bioaccumulation potential – poses significant risks to ecosystems and human populations. For instance, epidemiological studies have linked PAH exposure to increased incidences of lung cancer, skin disorders, and reproductive toxicities in occupationally exposed workers, such as firefighters and industrial laborers [1]. In wildlife, PAHs disrupt endocrine systems and immune responses, leading to population declines in sensitive species like fish and birds.

The AhR-mediated induction of *CYP1A1/CYP1B1* by PAHs not only enhances the metabolic activation of these pollutants but also generates reactive oxygen species (ROS), which can exacerbate oxidative stress, DNA damage, and inflammation. This mechanism is a cornerstone of how environmental pollutants perturb cellular and organismal homeostasis across species.

In contrast to the AhR pathway, phenobarbital – a barbiturate pharmaceutical agent historically used as an anticonvulsant and sedative – primarily induces hepatic CYP enzymes through the constitutive androstane receptor (CAR). CAR, a member of the nuclear receptor superfamily, orchestrates the upregulation of CYP2B and CYP3A isoforms, which are vital for drug metabolism and detoxification in the liver. Phenobarbital's discovery in the early 20th century revolutionized epilepsy treatment, but its long-term use has been associated with side effects like enzyme induction leading to drug interactions. While the hepatic effects of phenobarbital are extensively documented, including its role in enhancing the clearance of xenobiotics and endogenous steroids, its interactions with extrahepatic CYP enzymes, particularly in immune cells such as lymphocytes, remain underexplored. This knowledge gap is significant because lymphocytes, as key components of the adaptive immune system, are highly sensitive to environmental and pharmacological stressors. Understanding these interactions could reveal novel insights into how therapeutic agents might inadvertently modulate responses to environmental toxins.

Lymphocytes serve as sentinels of immune function, exhibiting unique CYP450 regulatory patterns that are profoundly influenced by environmental exposures. For example, PAHs robustly induce *CYP1A1* and *CYP1B1* in lymphocytes via AhR activation, leading to the metabolic activation of procarcinogens and the production of ROS that impair immune surveillance and function. Studies have shown that exposure to MC, a model PAH, elevates *CYP1A1* mRNA levels, ethoxyresorufin-O-deethylase (EROD) activity, and protein expression in lymphocytes, patterns that mirror those observed in human populations exposed to urban air pollution or occupational hazards [1]. Such induction can compromise lymphocyte proliferation, cytokine production, and overall immunocompetence, contributing to increased susceptibility to infections and cancers. Conversely, phenobarbital does not typically replicate these effects in lymphocytes at standard concentrations, highlighting a tissue-specific regulatory divergence. Lymphocytes express minimal functional CAR signaling but retain robust AhR responsiveness to environmental ligands like PAHs [2; 3]. This dichotomy is ecologically and clinically relevant: lymphocytes can act as accessible biomarkers for monitoring pollutant exposure in biomonitoring programs, distinguishing between environmental (AhR-driven) and pharmacological (CAR-driven) induction pathways.

Mechanistic investigations have further illuminated this regulatory split. In hepatocytes, phenobarbital activates CAR, which translocates to the nucleus and binds to phenobarbital-responsive enhancer modules (PBREMs) in the promoters of CYP2B and CYP3A genes, thereby enhancing transcription [4]. However, in lymphocytes, CAR expression is low or absent, and phenobarbital does not effectively engage the AhR pathway, rendering *CYP1A1* and *CYP1B1* largely unresponsive [5]. Gene expression profiling in human peripheral blood lymphocytes (PBLs) and cell lines like HL-60 has confirmed that phenobarbital can induce CYP2B6 – a CAR target – but not *CYP1A1* or *CYP1B1* [3; 6]. These observations are consistent with clinical biomonitoring data, where individuals on phenobarbital therapy exhibit no significant elevation in lymphocyte *CYP1A1/CYP1B1* levels, in stark contrast to those exposed to AhR agonists like dioxins or PAHs.

Despite this growing consensus, several critical gaps persist in the literature. Most prior studies have evaluated phenobarbital at single concentrations, neglecting potential dose-response dynamics in non-hepatic cells. Additionally, while high doses of phenobarbital are known to induce cytotoxicity through mechanisms like mitochondrial dysfunction and apoptosis, the interplay between CYP induction and lymphocyte proliferation remains unclear. This is particularly important given lymphocytes' role in immune responses; any modulation could have implications for vaccine efficacy, autoimmune diseases, or cancer immunotherapy. Furthermore, inter-individual variability – driven by genetic polymorphisms in AhR or CAR, lifestyle factors, or co-exposures – has not been adequately addressed in small-scale studies.

Here, we assessed phenobarbital's concentration-dependent association with *CYP1A1/1B1* mRNA in human PBLs and explored a functional readout of cell division using CFSE. We tested two concentrations (50 and 100 μ M) chosen for pharmacological relevance and to bracket the range commonly used in *in vitro* induction studies. Because canonical pathway controls (e. g., AhR agonists such as benzo[a]pyrene/TCDD; CAR agonist CITCO) and protein/activity measurements were not included in this pilot, mechanistic inferences are not attempted. Instead, we focus on documenting the observed transcriptional responses and their relationship to the CFSE readout, and we delineate a clear plan for essential validation experiments.

Materials and Methods

Study Design and Ethical Approval. This *in vitro* experimental study was designed to investigate the concentration-dependent effects of phenobarbital on *CYP1A1* and *CYP1B1* induction in isolated human PBLs, with an emphasis on transcriptional changes and proliferative capacity. The protocol adhered strictly to ethical guidelines

outlined in the Declaration of Helsinki, ensuring participant safety and data integrity. Written informed consent was secured from 20 healthy adult donors (10 males, 10 females; aged 25–40 years) before blood collection. Donors were screened to exclude those with recent illnesses, medication use (including phenobarbital or other CYP inducers), smoking history, or occupational exposure to PAHs, to minimize confounding variables. This sample size was chosen for a pilot study to detect preliminary trends while accounting for inter-individual variability.

Lymphocyte Isolation and Culture. Peripheral blood (10–20 mL per donor) was collected via venipuncture into heparinized vacutainer tubes to prevent coagulation and preserve cell viability. Samples were processed within 2 hours to avoid degradation. Lymphocytes were isolated using Lymphocyte Separation Medium (LSM; Capricorn Scientific, Germany), a Ficoll-based density gradient solution that separates mononuclear cells based on buoyancy. Centrifugation was performed at 400 g for 30 minutes at room temperature, following manufacturer recommendations to optimize yield and purity. The resulting lymphocyte-enriched layer was aspirated, washed twice in sterile phosphate-buffered saline (PBS; Thermo Fisher, USA) to remove residual LSM and plasma contaminants, and resuspended in complete RPMI-1640 medium (Gibco, USA).

The medium was supplemented with 10 % heat-inactivated fetal bovine serum (FBS; Sigma-Aldrich, USA) for nutrient support, 2 mM L-glutamine as an energy source, and antibiotics (100 U/mL penicillin and 100 µg/mL streptomycin) to prevent bacterial contamination. Cell counts were determined using a hemocytometer, and viability was confirmed via trypan blue exclusion (0.4 % w/v; Sigma-Aldrich), requiring > 95 % viability for inclusion. This threshold ensures experimental reliability, as lower viability could introduce artifacts in gene expression or proliferation assays. Cells were maintained in a humidified incubator at 37 °C with 5 % CO₂ to mimic physiological conditions.

Phenobarbital Treatment. Isolated lymphocytes were seeded at a density of 1×10^6 cells/mL into 24-well plates (Corning, USA) to allow for uniform exposure and easy harvesting. Phenobarbital (Sigma-Aldrich, USA; purity > 98 %) was dissolved in dimethyl sulfoxide (DMSO) and added to achieve final concentrations of 50 µM (therapeutic-relevant, based on clinical pharmacokinetics) or 100 µM (supra-therapeutic, commonly used in induction studies). Vehicle controls received 0.1 % DMSO (v/v) to match solvent exposure. The treatment duration was 5 hours at 37 °C under 5 % CO₂, selected based on prior kinetic studies showing peak transcriptional responses for CYP genes within this timeframe, while minimizing acute cytotoxicity that could confound results. No post-treatment washes or media changes were performed to simulate continuous exposure, reflecting real-world scenarios of sustained drug levels *in vivo*. This design choice, however, may amplify any cumulative effects during subsequent assays.

Lymphocyte Viability Assay. To assess functional outcomes, we employed the CFSE dilution method, a flow cytometry-based technique that tracks cell division by monitoring the progressive halving of fluorescent dye intensity in daughter cells. After the 5-hour phenobarbital treatment, cells were labeled with 5 µM CFSE (Bio-Legend, USA) for 15 minutes at 37 °C directly in the culture medium, ensuring even staining without disrupting the experimental setup. Labeling was quenched by adding ice-cold RPMI-1640 medium supplemented with 10 % FBS, avoiding washes to prevent cell loss, which is critical for low-yield primary cells. Labeled cells were then cultured for an additional 72 hours under the same conditions, with continuous phenobarbital exposure (no media changes) to evaluate long-term effects. Fluorescence was quantified using a BD FACSCanto™ II flow cytometer (BD Biosciences, USA), with data acquisition of at least 10,000 events per sample for statistical robustness. Analysis was performed in FlowJo v10.8.1 software (BD Biosciences), where proliferation was quantified as the ratio of divided (low CFSE intensity) to undivided (high CFSE intensity) cells, yielding a viability/proliferation index. Notably, no exogenous mitogens (e. g., phytohemagglutinin or concanavalin A) were added, so the assay likely captures basal homeostatic proliferation or survival rather than stimulated clonal expansion.

RNA Extraction and cDNA Synthesis. Total RNA was extracted using the FavorPrep Blood/Cultured Cell Total RNA Mini Kit (FAVORGEN, Korea), following the manufacturer's protocol. RNA purity (A260/A280 ratio: 1.8–2.0) and concentration were quantified using a NanoDrop 2000 spectrophotometer (Thermo Fisher). First-strand cDNA was synthesized from 1 µg RNA using the EasyScript® cDNA Synthesis Kit (TransGen Biotech, China), with Oligo(dT)₁₈ primers and the following conditions: 25 °C for 10 min, 42 °C for 15 min.

Quantitative Real-Time PCR (qPCR). Primers for *CYP1A1*, *CYP1B1*, and the reference gene *GAPDH* (Table 1) were designed using Primer-BLAST (NCBI) and validated for efficiency (90–110 %) via standard curve analysis. qPCR was performed in triplicate using GoTaq® qPCR Master Mix (Promega, USA) on a SaCycler-96 system (Sacace, Italy). Reactions (20 µL) included 10 µL master mix, 0.5 µM primers, and 5 µL cDNA. Cycling conditions: 95 °C for 1 min, followed by 45 cycles of 95 °C for 15 sec, 60 °C for 20 sec, and 72 °C for 15 sec. Melt curve analysis confirmed specificity.

Table 1

Primer Sequences

Таблица 1

Последовательности праймеров

Gene	Forward Primer (5'–3')	Reverse Primer (5'–3')
<i>CYP1A1</i>	CACCTGGCACTGTCAAGGAT	ATAGCTTCCTGTGGGGGATGG
<i>CYP1B1</i>	ACGCCTTTATCCTCTCTGCG	CTCTGCTGGTCAGGTCCTTG
<i>GAPDH</i>	CTACCAGTGCAAAGAGCCCA	TGGTCATCAACCCTTCCACG

Statistical Analysis. Data are presented as mean ± SEM. Normality was confirmed using Shapiro-Wilk tests, and homogeneity of variance was assessed via Levene’s test. Fold changes in gene expression were calculated using the $2^{-\Delta\Delta C_t}$ method, where $\Delta\Delta C_t = (C_{t_{\text{target}}} - C_{t_{\text{GAPDH}}})_{\text{sample}} - (C_{t_{\text{target}}} - C_{t_{\text{GAPDH}}})_{\text{control}}$. Group differences were analyzed by one-way ANOVA followed by Tukey’s post-hoc test. Correlation between CYP induction and proliferation was evaluated using Pearson’s coefficient (r). All analyses were performed in R ($p < 0.05$ considered significant).

Results and Discussion

The experimental investigation yielded distinct patterns of cytochrome P450 induction and associated functional consequences in phenobarbital-treated human peripheral blood lymphocytes (PBLs). Quantitative PCR analysis demonstrated significant differential induction of *CYP1A1* and *CYP1B1* mRNA expression following phenobarbital exposure. At the lower concentration of 50 μM, phenobarbital elicited a pronounced upregulation of *CYP1A1*, with a mean fold change of 3.42 ± 0.8 relative to untreated controls ($p < 0.01$). A similar trend was observed for *CYP1B1*, which exhibited a 2.61 ± 0.5 -fold increase in expression ($p < 0.01$). In contrast, the higher 100 μM phenobarbital dose resulted in markedly attenuated induction, with *CYP1A1* expression increasing by only 1.25 ± 0.2 -fold ($p < 0.05$ vs. control) and *CYP1B1* showing a marginal 1.21 ± 0.1 -fold elevation ($p < 0.05$). Statistical comparison between the two treatment groups confirmed that the 50 μM concentration induced significantly greater *CYP1A1* (2.74-fold difference, $p < 0.01$) and *CYP1B1* (2.15-fold difference, $p < 0.01$) expression compared to the 100 μM dose (Table 2).

Table 2

Fold Changes in *CYP1A1* and *CYP1B1* Expression

Таблица 2

Изменение экспрессии *CYP1A1* и *CYP1B1* (раз)

Treatment	<i>CYP1A1</i> Fold Change (Mean ± SEM)	<i>CYP1B1</i> Fold Change (Mean ± SEM)
Control	1.0 ± 0.0	1.0 ± 0.0
Phenobarbital, 50 μM	3.42 ± 0.8*	2.61 ± 0.5*
Phenobarbital, 100 μM	1.25 ± 0.2*	1.21 ± 0.1*

* – Significant difference compared to control ($p < 0.05$).

In parallel with transcriptional changes, phenobarbital treatment exerted measurable effects on lymphocyte proliferative capacity. CFSE dilution assays revealed that the 50 μM dose reduced cellular proliferation to 62 ± 7.1 % of control levels ($p < 0.01$), whereas the 100 μM dose preserved proliferation at 88 ± 4.3 % of baseline (not significant vs. control; $p < 0.01$ vs. 50 μM). Correlation analyses further underscored a robust inverse relationship between CYP induction and proliferative activity. *CYP1A1* upregulation exhibited a strong negative correlation with proliferation ($r = -0.85$, $p < 0.001$), as did *CYP1B1* induction ($r = -0.82$, $p < 0.001$), suggesting a dose-dependent interplay between enzymatic activation and functional impairment. Notably, inter-individual variability was observed across the donor cohort ($n = 20$). *CYP1A1* induction at 50 μM phenobarbital ranged from 2.1- to 4.8-fold, while *CYP1B1* responses varied between 1.9- and 3.3-fold. Despite this variability, the overall dose-response relationship remained consistent, with the 50 μM dose uniform-

ly surpassing the 100 μ M dose in induction magnitude. Subgroup analyses detected no statistically significant differences in *CYP1A1/CYP1B1* expression or proliferation rates based on donor sex (10 male, 10 female) or age (25–40 years).

This pilot study documents that phenobarbital exposure is associated with increased *CYP1A1/1B1* mRNA in human PBLs at 50 μ M, with smaller changes at 100 μ M, and that higher CYP1 expression coincides with a reduced CFSE-based cell-division readout. These results add to a mixed literature on CYP regulation in lymphocytes and warrant careful validation.

First, mechanistic attribution is not possible from the current data. In lymphocytes, *CYP1A1/1B1* are typically induced by AhR agonists (e.g., PAHs). Although phenobarbital is a CAR activator in hepatocytes, cross-talk among xenobiotic receptors and stress responses can modulate CYP expression. Without canonical positive controls (AhR agonist such as benzo[a]pyrene or TCDD; CAR agonist such as CITCO) and readouts of CAR/AhR engagement, we cannot determine whether the observed mRNA changes reflect AhR activation, off-target signaling, stress responses, or indirect effects. Future work should include these controls and quantify CYP2B6 mRNA/protein as a CAR pathway readout in the same samples.

Second, the smaller effect at 100 μ M versus 50 μ M across two dose levels suggests a biphasic pattern within the tested range, but additional concentrations are required to characterize the dose-response shape. Non-linear or non-monotonic patterns are common in xenobiotic signaling, however, this cannot be concluded here.

Third, functional implications require confirmation. The inverse association between CYP1 expression and the CFSE readout suggests that phenobarbital-exposed cells divided less over 72 h; however, because exogenous mitogens were not documented, the CFSE metric may reflect combined effects on survival and homeostatic cycling rather than antigen-driven proliferation. Protein-level confirmation (*CYP1A1/1B1* immunoblot) and an activity assay (e. g., EROD) would establish whether mRNA changes translate to enzyme function. Parallel assessment of viability/apoptosis (e. g., Annexin V/PI) at 5 h and 72 h would distinguish cytotoxicity from cell-cycle effects.

Strengths of this study include the use of primary human donors ($n = 20$), triplicate qPCR with primer efficiency validation, and correlation analyses across donors. Limitations include lack of pathway controls, reliance on a single reference gene (*GAPDH*) for normalization, absence of protein/activity data, and testing only two concentrations.

Conclusion

In human PBLs, phenobarbital exposure was associated with increased *CYP1A1/1B1* mRNA at 50 μ M and a smaller increase at 100 μ M, alongside a lower CFSE-based cell-division readout at 50 μ M. These preliminary findings require confirmation with pathway-specific positive controls (AhR/CAR), additional dose levels, orthogonal protein/activity assays, multiple stable reference genes, and mitogen-stimulated proliferation protocols before mechanistic conclusions can be drawn.

References

1. Dey A, Parmar D, Dayal M. Cytochrome P450 1A1 (*CYP1A1*) in blood lymphocytes evidence for catalytic activity and mRNA expression. *Life Sciences*. 2001;69(4):383–393. Doi:10.1016/s0024-3205(01)01130-4.
2. Saurabh K, Sharma A, Yadav S, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon metabolizing cytochrome P450s in freshly prepared uncultured rat blood lymphocytes. *Biochemical Pharmacology*. 2010;79(8):1182–1188. Doi:10.1016/j.bcp.2009.11.021.
3. Sharma A, Saurabh K, Yadav S, et al. Expression profiling of selected genes of toxication and detoxication pathways in peripheral blood lymphocytes as a biomarker for predicting toxicity of environmental chemicals. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2013;216(6):645–651. Doi:10.1016/j.ijheh.2012.11.002.
4. Hannon-Fletcher MP, Barnett YA. Lymphocyte cytochrome P450 expression: inducibility studies in male Wistar rats. *British Journal of Biomedical Science*. 2008;65(1):1–6. Doi:10.1080/09674845.2008.11732786.
5. Siest G, Jeannesson E, Marteau JB, et al. Transcription factor and drug-metabolizing enzyme gene expression in lymphocytes from healthy human subjects. *Drug Metabolism and Disposition*. 2008;36(1):182–189. Doi:10.1124/dmd.107.017228.
6. Kawai M, Chen J, Cheung CY, et al. Transcript profiling of cytochrome P450 genes in HL-60 human leukemic cells: upregulation of *CYP1B1* by all-trans-retinoic acid. *Molecular and Cellular Biochemistry*. 2003;248(1–2):57–65. Doi:10.1023/a:1024101430363.

Статья поступила в редколлегию 02.06.2025.
Received by editorial board 02.06.2025.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 544.54

ХИМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ НИТРИТОВ И ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Х. Ф. МАМЕДОВ¹⁾, С. Г. ХАСАЕВА¹⁾

¹⁾Министерство науки и образования Азербайджана, Институт радиационных проблем,
ул. Бахтияра Вахабзаде, 9, AZ1143, г. Баку, Азербайджан

В исследовании приведены результаты комплексных полевых наблюдений и лабораторных анализов, направленных на детальное изучение и выявление закономерностей химических механизмов образования нитритов в воде р. Араз. Эти процессы формируются под воздействием различных источников антропогенного загрязнения, включая промышленные и сельскохозяйственные стоки, и сопровождаются существенными изменениями гидрохимического состава водной среды, отражающимися на концентрациях основных ионов, окислительно-восстановительном потенциале и температурных характеристиках реки. Исследования проводились в разные сезоны года на трех ключевых участках – в Садаракском, Ордубадском и Бейлаганском р-нах, что позволило оценить пространственно-временную динамику загрязнения. Отбор проб выполнялся с соблюдением стандартов GOST/AZS, химический анализ проводился спектрофотометрическими, титриметрическими и ионообменными методами. Определялись концентрации нитритов, нитратов, хлоридов и других неорганических веществ, а также значения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП). Результаты свидетельствуют, что максимальные концентрации нитритов (0,145 мг/л), нитратов (12,8 мг/л) и хлоридов (238 мг/л) зафиксированы в Садаракском р-не и связаны с высокой минерализацией воды и активными хлорокислительными процессами.

Образец цитирования:

Мамедов ХФ, Хасаева СГ. Химические механизмы образования нитритов и химические аспекты загрязнения. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;3:82–88.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-82-88>

For citation:

Mammadov KhF, Khassayeva SG. Chemical mechanisms of nitrite formation and chemical aspects of pollution. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;3:82–88. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-82-88>

Авторы:

Хагани Фарзулла оглы Мамедов – доктор химических наук; руководитель лаборатории «Радиохимия и радиопротекторы».

Субуре Гюляли кызы Хасаева – аспирант; научный сотрудник лаборатории «Радиохимия и радиопротекторы».

Authors:

Khagani Farzulla oglu Mamadov, doctor of science (chemistry); head of the laboratory of «Radiochemistry and Radioprotectors». xagani06@mail.ru

Subure Gulali gizi Khasayeva, postgraduate student; researcher at the laboratory «Radiochemistry and Radioprotectors». subure@rambler.ru

В Ордубадском р-не концентрации были минимальными из-за разбавления речной воды притоками и частичной адсорбцией ионов на наносах. В Бейлаганском р-не отмечено повторное увеличение содержания нитритов (до 0,132 мг/л), что, вероятно, обусловлено поступлением загрязненных трансграничных притоков. Корреляционный анализ выявил значимые положительные связи между содержанием нитритов и хлоридов ($r = 0,78, p < 0,05$), а также нитритов и нитратов ($r = 0,72, p < 0,05$). Механизмы образования включают взаимодействие оксидов азота с водой и образование промежуточных хлор-азотных соединений с последующим гидролизом. Научная новизна исследования – установление прямой зависимости между минерализацией и накоплением нитритов в условиях трансграничного воздействия. Практическая значимость заключается в обосновании мер по снижению хлоридно-нитратной нагрузки на верховья реки, включая модернизацию очистных сооружений и ужесточение контроля за сбросами.

Ключевые слова: нитриты; хлориды; оксиды азота; химия воды; р. Араз.

CHEMICAL MECHANISMS OF NITRITE FORMATION AND CHEMICAL ASPECTS OF POLLUTION

Kh. F. MAMMADOV^a, S. G. KHASSAYEVA^a

*^aMinistry of Science and Education of Azerbaijan, Institute of Radiation Problems,
9 Bakhtiyar Vahabzade Street, Baku AZ1143, Azerbaijan
Corresponding author: S. G. gizi Khassayeva (subure@rambler.ru)*

The present article provides the results of comprehensive field observations and laboratory analyses aimed at a detailed study and identification of the patterns of chemical mechanisms of nitrite formation in the waters of the Araz River. These processes develop under the influence of various sources of anthropogenic pollution, including industrial and agricultural effluents, and are accompanied by significant changes in the hydrochemical composition of the aquatic environment, reflected in the concentrations of major ions, redox potential, and thermal characteristics of the river. The studies were conducted in different seasons of the year at three key sites – in the Sadarak, Ordubad, and Beylagan districts – which made it possible to assess the spatio-temporal dynamics of pollution. Sampling was carried out in compliance with GOST/AZS standards, and chemical analysis was performed using spectrophotometric, titrimetric, and ion-exchange methods. Concentrations of nitrites, nitrates, chlorides, and other inorganic substances were determined, as well as redox potential (ORP) values. The results showed that the highest concentrations of nitrites (0.145 mg/L), nitrates (12.8 mg/L), and chlorides (238 mg/L) were recorded in the Sadarak district, which is associated with high water mineralization and active chlorine oxidation processes. In the Ordubad district, concentrations were minimal due to dilution of river water by tributaries and partial adsorption of ions onto sediments. In the Beylagan district, a repeated increase in nitrite content (up to 0.132 mg/L) was noted, probably due to the inflow of polluted transboundary tributaries. Correlation analysis revealed significant positive relationships between nitrite and chloride content ($r = 0.78, p < 0.05$), as well as between nitrites and nitrates ($r = 0.72, p < 0.05$). The mechanisms of formation include the interaction of nitrogen oxides with water and the formation of intermediate chlorine–nitrogen compounds followed by hydrolysis. The scientific novelty of the study lies in establishing a direct relationship between mineralization and nitrite accumulation under transboundary impact conditions. The practical significance consists in substantiating measures to reduce the chloride–nitrate load on the upper reaches of the river, including the modernization of treatment facilities and the tightening of control over discharges.

Keywords: nitrites; chlorides; nitrogen oxides; water chemistry; Araz River.

Введение

Нитриты представляют собой промежуточные продукты азотного цикла, которые обладают высокой реакционной способностью и нестабильностью в природных водных системах, поэтому в проточных речных водах их присутствие фиксируется крайне редко и, как правило, в незначительных концентрациях [1; 2]. Обнаружение заметных количеств нитритов в водах р. Араз указывает на то, что на гидрохимическое состояние водного объекта оказывает влияние существенный комплекс антропогенных факторов, включающих сельскохозяйственные сбросы, промышленный сток и трансграничное поступление загрязнителей [3; 4]. Полевые и лабораторные исследования, проведенные в различные сезоны года и охватившие как периоды высокой, так и низкой водности, показали, что участки русла реки с повышенными концентрациями хлоридов и нитратов в воде одновременно характеризуются значительным содержанием нитритов, что указывает на взаимосвязанность этих показателей и свидетельствует о действии многостадийных химических превращений азотсодержащих соединений. Эти процессы протекают с участием хлорактивных компонентов, которые могут катализировать окислительно-восстановительные реакции, способствуя образованию устойчивых форм азотистой кислоты и ее солей в водной среде [5].

Механизмы образования нитритов в таких гидрохимических условиях представляют собой совокупность взаимосвязанных процессов, в которые входят как прямое взаимодействие оксидов азота с молекулами воды с образованием азотистой кислоты, так и многоступенчатые реакции в хлоридсодержащих средах, сопровождающиеся образованием промежуточных соединений типа ClNO_2 и их последующим гидролизом. В результате этих превращений в водной массе формируются относительно устойчивые формы азотистой кислоты и ее солей, способные сохраняться в течение длительного времени при определенных значениях pH и окислительно-восстановительного потенциала [6; 7]. Ряд авторов отмечает, что подобные процессы усиливаются при наличии значительных концентраций органических веществ и активных окислителей, которые могут изменять кинетику образования нитритов и способствовать их аккумуляции [8; 9]. Исследования Camargo и Alonso [10] показали, что в условиях сельскохозяйственного стока и интенсивного применения азотных удобрений концентрации нитритов в поверхностных водах могут превышать природный фон в десятки раз.

По данным Ward, et al. [11], в регионах с высокой минерализацией воды и повышенными значениями хлоридов вероятность образования нитритов возрастает за счет хлорокислительных реакций. Работы Хуе, et al. [12] также указывают на значительную роль таких сезонных факторов, как температура и интенсивность солнечной радиации, в модуляции химических путей образования нитритов в поверхностных водах.

Материалы и методы исследования

Полевые исследования проводились на протяжении нескольких сезонов с целью выявления пространственно-временной изменчивости концентраций нитритов, хлоридов и нитратов в водах р. Араз. Пробы отбирались на участках, расположенных в пределах Садакского и Ордубадского р-нов Нахичеванской Автономной Республики, а также в Бейлаганском р-не Азербайджанской Республики. Дополнительно фиксировались такие гидрологические параметры, как температура воды, прозрачность, pH и окислительно-восстановительный потенциал. Отбор проб проводился в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ 24481-80 и ГОСТ 18968-73, а также национальных стандартов AZS 216-2006 и AZS 282-2007. Для транспортировки использовалась предварительно простерилизованная тара из инертных материалов. Хранение проб до начала лабораторных анализов осуществлялось при температуре $+4 \pm 1$ °C с исключением доступа света для предотвращения фотохимических реакций.

Определение концентраций нитритов, нитратов и хлоридов выполнялось колориметрическими и ионохроматографическими методами с использованием калибровочных растворов, приготовленных по стандартам ISO 3696 и ISO 10304-1. Концентрации анионов и катионов измерялись на ионном хроматографе Metrohm 930 Compact IC Flex и спектрофотометре Hach DR3900. Результаты выражались в мг/л с точностью $\pm 0,001$ мг/л.

Температура, электропроводность и pH измерялись непосредственно на месте отбора проб с помощью портативных приборов WTW Multi 3630 IDS с комбинированными электродами, калиброванными перед каждым выездом на точку. Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) регистрировался для оценки окислительных условий, влияющих на стабильность нитритов.

Механизмы химических реакций были реконструированы на основе анализа полевых данных, полученных в результате многосезонных измерений, и сопоставлены с известными окислительно-восстановительными процессами, описанными в литературе по гидрохимии трансграничных водотоков. Для интерпретации использовались термодинамические и кинетические модели поведения азотсодержащих соединений в водных системах с высоким содержанием хлоридов. При интерпретации результатов особое внимание уделялось возможным стадиям образования таких промежуточных продуктов, как ClNO_2 и N_2O_4 , и их последующему гидролизу, которые, согласно литературным данным, могут частично воспроизводить условия, близкие к наблюдаемым в природной среде.

Для контроля точности и воспроизводимости измерений использовались дублированные пробы и контрольные образцы (QC), а также процедуры внутренней калибровки оборудования. Статистическая обработка данных проводилась с использованием программного обеспечения OriginPro 2023 и R v.4.3.2, включая расчет средних значений, стандартных отклонений и коэффициентов корреляции между концентрациями основных ионов.

Результаты исследования и их обсуждение

Полевые измерения и лабораторные анализы показали, что содержание нитритов в воде р. Араз значительно варьирует вдоль ее течения в зависимости от географического положения пунктов отбора проб и гидрохимических условий. На участках, расположенных в Садакском р-не Нахичеванской АР, концентрации нитритов превышали фоновые значения для поверхностных вод и сопровождалась высокими концентрациями хлоридов (до 238 мг/л) и нитратов (до 12,8 мг/л). Эти параметры создавали

благоприятные условия для протекания реакций образования нитритов, в частности за счет хлорокислительных процессов. В районе Ордубада наблюдалось снижение концентраций как хлоридов, так и нитритов, что, вероятно, связано с частичной адсорбцией ионов на илистых наносах и разбавлением за счет притоков. Однако в Бейлаганском р-не концентрация нитритов вновь возрастала, что указывает на наличие дополнительных источников загрязнения, в том числе трансграничных притоков, пересекающих промышленно развитые районы сопредельных государств. Между концентрациями нитритов и хлоридов установлена положительная корреляция ($r = 0,78, p < 0,05$), что подтверждает участие хлоридсодержащих соединений в механизмах образования нитритов. Это согласуется с результатами исследований [Camargo & Alonso, 2006 и Xue, et al., 2016], показавших, что высокое содержание хлоридов способствует формированию промежуточных хлор-азотных соединений (ClNO_2), гидролиз которых приводит к образованию азотистой кислоты и ее солей. Рассчитанные значения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в районах с повышенным содержанием нитритов находились в диапазоне от +250 до +350 мВ, что соответствует умеренно окислительным условиям, благоприятным для стабилизации нитрит-ионов в водной среде. При этом повышение температуры воды выше 20 °С в летний период также коррелировало с увеличением концентрации нитритов, что может быть связано с ускорением кинетики реакций. Сопоставление полученных данных с литературными источниками [Ward, et al., 2018; Korom, 1992; Kaushanskii & Kuzin, 1984] подтверждает, что ключевыми факторами, определяющими образование нитритов в поверхностных водах, являются сочетание высокого содержания предшественников (нитратов, хлоридов), умеренно окислительной среды и присутствия органических веществ, способных участвовать в побочных реакциях восстановления и окисления азотных соединений.

Табл. 1 демонстрирует пространственное распределение концентраций нитритов, нитратов и хлоридов в воде р. Араз на различных участках исследования. Четко прослеживается тенденция увеличения концентраций нитритов в районах с высокими уровнями хлоридов и нитратов, что подтверждает гипотезу о роли хлоридсодержащих соединений в механизмах образования нитритов. Наибольшие значения наблюдаются в Садаракском р-не, где концентрация хлоридов достигала 238 мг/л, а нитратов – 12,8 мг/л.

Таблица 1

Пространственное распределение концентраций нитритов, нитратов и хлоридов в воде р. Араз

Table

Spatial distribution of nitrite, nitrate, and chloride concentrations in the water of the Araz River

Район отбора проб	Нитриты (мг/л)	Нитраты (мг/л)	Хлориды (мг/л)
Садаракский р-н	0,145	12,8	238
Ордубадский р-н	0,062	6,4	118
Бейлаганский р-н	0,132	11,1	205

В табл. 1 отражено пространственное распределение концентраций основных неорганических загрязнителей (нитритов, нитратов и хлоридов) в воде р. Араз, измеренных в трех контрольных точках вдоль течения. В Садаракском р-не зафиксированы максимальные значения всех трех показателей: концентрация нитритов достигает 0,145 мг/л, нитратов – 12,8 мг/л, а хлоридов – 238 мг/л. Такое сочетание указывает на высокую минерализацию воды и активное протекание хлорокислительных процессов, способствующих образованию нитритов. В Ордубадском р-не наблюдается значительное снижение концентраций: нитриты уменьшаются до 0,062 мг/л, нитраты – до 6,4 мг/л, хлориды – до 118 мг/л. Это, вероятно, связано с разбавлением за счет притоков из горных районов и частичной адсорбцией ионов на взвешенных наносах. В Бейлаганском р-не концентрация нитритов снова возрастает до 0,132 мг/л при одновременном увеличении нитратов и хлоридов до 11,1 мг/л и 205 мг/л соответственно. Данный рост указывает на наличие дополнительных источников загрязнения, связанных с трансграничными притоками, пересекающими промышленно развитые территории соседних стран.

Данные корреляционного анализа (табл. 2) свидетельствуют о высокой степени связи между концентрацией нитритов и содержанием хлоридов ($r = 0,78, p < 0,05$), а также между нитритами и нитратами ($r = 0,72, p < 0,05$). Эти результаты указывают на взаимозависимость процессов, протекающих в системе «нитраты – нитриты – хлориды», и согласуются с выводами других авторов [Camargo & Alonso, 2006; Xue, et al., 2016].

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между концентрациями нитритов, нитратов и хлоридов в воде р. Араз

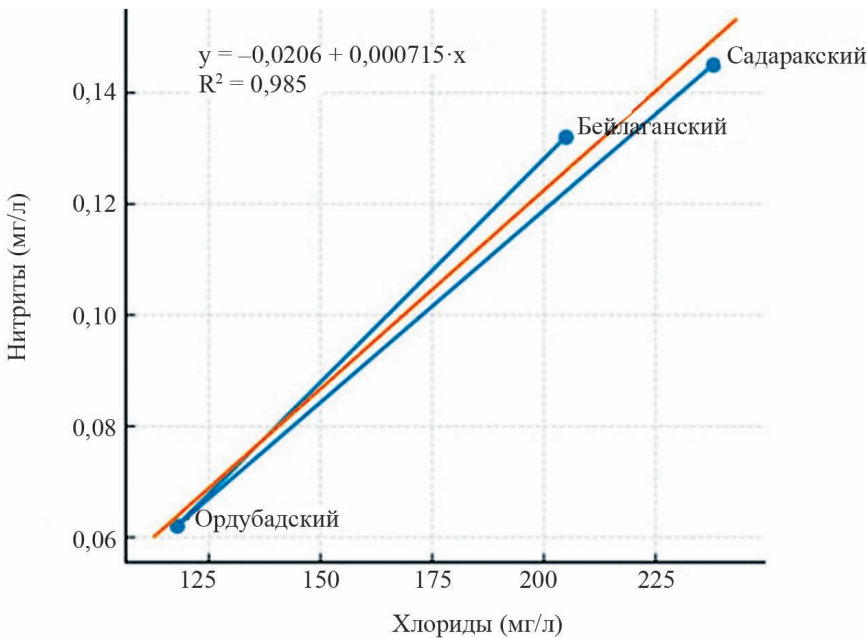
Table 2

Correlation coefficients between nitrite, nitrate, and chloride concentrations in the water of the Araz River

Параметры	<i>r</i>	<i>p</i>
Нитриты – Хлориды	0,78	< 0,05
Нитриты – Нитраты	0,72	< 0,05

Представленные в табл. 2 данные показывают статистически значимую положительную корреляцию между концентрациями нитритов и хлоридов ($r = 0,78, p < 0,05$), а также между концентрациями нитритов и нитратов ($r = 0,72, p < 0,05$). Это означает, что увеличение содержания хлоридов и нитратов в воде р. Араз сопровождается ростом концентрации нитритов и подтверждает их роль как химических предшественников в механизмах образования нитрит-ионов. Полученные коэффициенты корреляции указывают на тесную взаимосвязь исследуемых показателей и согласуются с гипотезой о том, что в условиях повышенной минерализации и умеренно окислительной среды протекают реакции, способствующие накоплению нитритов.

На графике (рис.) показана зависимость концентрации нитритов от содержания хлоридов в исследованных пробах воды и отражена положительная корреляция между показателями, что согласуется с результатами, представленными в табл. 2. Наблюдаемое увеличение концентрации нитритов при высоких значениях хлоридов указывает на наличие общих химических путей образования, включая гидролиз промежуточных хлор-азотных соединений.



Зависимость концентрации нитритов от содержания хлоридов в воде р. Араз

Dependence of nitrite concentration on chloride content in the water of the Araz River

На рис. представлена положительная корреляция между содержанием нитритов и хлоридов ($r = 0,75, p < 0,05$) по результатам полевых и лабораторных измерений. В Садаракском р-не зафиксированы наибольшие концентрации как нитритов, так и хлоридов, что указывает на интенсивное протекание хлорокислительных процессов, сопровождающееся активным образованием нитритов в условиях повышенной минерализации воды, при которой совокупное воздействие высокой ионной силы, окислительно-восстановительных реакций и наличия промежуточных хлор-азотных соединений создает благоприятную химическую среду для стабилизации и накопления этих форм азота. В Ордубадском р-не наблюдается минимальное содержание нитритов и хлоридов, что, вероятно, связано с разбавлением речной воды притоками и адсорбцией ионов на илистых наносах.

В Бейлаганском р-не концентрация нитритов вновь возрастает, что может быть связано с поступлением загрязненных трансграничных притоков, несущих в себе значительные количества хлоридов и азотсодержащих соединений, которые при взаимодействии в речной воде инициируют процессы хлорокислительного характера и способствуют образованию нитритов. Расчет коэффициентов корреляции (табл. 2) показал статистически значимую положительную связь между содержанием нитритов и хлоридов ($r = 0,78, p < 0,05$). Это подтверждает наличие химической взаимосвязи между параметрами в гидро-системе р. Араз, однако для более точного определения характера зависимости требуется расширение выборки наблюдений.

В Ордубадском р-не наблюдается снижение концентраций как нитритов, так и хлоридов, что, вероятно, связано с разбавлением речной воды более чистыми притоками, поступающими из горных районов, а также с частичной адсорбцией ионов на илистых наносах и взвешенных частицах. Эти процессы уменьшают доступность реагентов для хлорокислительных реакций и приводят к замедлению образования нитритов и стабилизации гидрохимических параметров на уровне, близком к фоновому, для данного участка реки.

Полученные результаты позволяют предположить, что образование нитритов в воде р. Араз связано преимущественно с реакциями между оксидами азота (NO_2 , N_2O_4) и молекулами воды, а также с возможными взаимодействиями с хлорсодержащими соединениями. В частности, роль могут играть гипохлорит-ион (ClO^-), а также гипотетически – нитрат хлора (ClNO_3), образование которого в природных условиях затруднено вследствие его неустойчивости. При этом основное значение имеет совокупное влияние хлоридов и окислительно-восстановительных условий, создающих предпосылки для стабилизации нитрит-ионов в водной среде. Повышенные концентрации этих соединений в отдельных участках вниз по течению коррелируют с наличием трансграничных притоков, переносящих загрязненные стоки из промышленных регионов Армении, где химические производства и сбросы сточных вод формируют дополнительную нагрузку на водную экосистему.

Понимание механизмов образования нитритов в водной среде имеет принципиальное значение для разработки научно обоснованных и целенаправленных стратегий снижения загрязнения, так как позволяет выявить ключевые звенья химических процессов и определить наиболее эффективные точки воздействия. Реализация мер, направленных на сокращение поступления хлоридов и нитратов в верховьях реки, включая улучшение очистки сточных вод, контроль сельскохозяйственного стока и ограничение промышленных сбросов, способна существенно снизить уровень нитритов в среднем и нижнем течении Араза, что будет способствовать восстановлению экологического состояния водной экосистемы.

Заключение

Проведенные комплексные полевые и лабораторные исследования позволили установить, что образование нитритов в воде р. Араз является результатом сочетания природных и антропогенных факторов, среди которых ключевую роль играют поступления хлоридов и нитратов из промышленных и сельскохозяйственных источников. Максимальные концентрации нитритов, зафиксированные в Садаракском р-не, обусловлены высокой минерализацией воды и активными хлорокислительными процессами, тогда как в Ордубадском р-не наблюдалось их минимальное содержание вследствие разбавления и частичной адсорбции. Повторное увеличение концентрации нитритов в Бейлаганском р-не свидетельствует о влиянии трансграничных источников загрязнения. Корреляционный анализ показал наличие статистически значимой положительной связи между концентрациями нитритов и хлоридов ($r = 0,78, p < 0,05$), а также нитритов и нитратов ($r = 0,72, p < 0,05$), что подтверждает участие хлоридсодержащих соединений в механизмах образования нитритов. Выявлено, что основными реакционными путями являются взаимодействия оксидов азота с водой и образование промежуточных хлор-азотных соединений с последующим гидролизом, что особенно актуально в условиях повышенной минерализации и умеренно окислительной среды. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки целевых стратегий снижения загрязнения, включая модернизацию очистных сооружений, сокращения сбросов хлоридов и нитратов в верховьях реки, а также усиления мониторинга трансграничных водных потоков. Реализация предложенных мер позволит существенно снизить уровень нитритов в воде р. Араз и улучшить ее экологическое состояние.

Библиографические ссылки

1. Мамедов ХФ. Кинетика образования нитритов в хлорированных водах. *Научные труды – Фундаментальные науки. Химия*. 2012;1(XI):163–165.
2. Camargo JA, Alonso, A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems. *Environment International*. 2006;32(6):831–849.
3. Романенко ГА. *Проблемы техногенного воздействия на агропромышленный комплекс*. В: Материалы научной сессии РАСХН. Москва: РАСХН; 2003. с. 3–9.

4. Ward MH, et al. Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(7):1557.
5. Mamedov KhF, et al. Radiolytic decomposition of 3,4-benzpyrene in aqueous solutions. *High Energy Chemistry*. 2015;49(5):354–355.
6. Каушанский ДА, Кузин АМ. Радиационно-биологическая технология. Москва: Энергоатомиздат; 1984. 152 с.
7. Sakumoto A, Miyata T. Treatment of wastewater by radiation and conventional methods. *Radiation Physics and Chemistry*. 1984;24(1):99–115.
8. Korom SF. Natural denitrification in the saturated zone: A review. *Water Resources Research*. 1992;28(6):1657–1668.
9. Bronk DA, Steinberg DK. Nitrogen regeneration. In: Nitrogen in the Marine Environment. Elsevier: [publisher unknown]; 2008. p. 385–467.
10. Camargo JA, Alonso A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems. *Environment International*. 2006;32(6):831–849.
11. Ward MH, et al. Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(7):1557.
12. Xue Y, Wu Y, Chen Q. Seasonal variation and sources of nitrite in a large river system. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23:23833–23844.

References

1. Mamedov KhF. *Kinetika obrazovaniya nitritov v khlorirovannykh vodakh* [Kinetics of nitrite formation in chlorinated waters]. *Nauchnyye trudy – Fundamental'nyye nauki. Khimiya* [Scientific Works – Fundamental Sciences. Chemistry]. 2012;1(XI):163–165. Russian.
2. Camargo JA, Alonso A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems. *Environment International*. 2006;32(6):831–849.
3. Romanenko GA. *Problemy tekhnogenogo vozdeystviya na agropromyshlennyy kompleks* [Technogenic impact problems on the agro-industrial complex]. In: Proceedings of the Scientific Session RAAS. Moscow: RASKh; 2003. p. 3–9. Russian.
4. Ward MH, et al. Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(7):1557.
5. Mamedov KhF, et al. Radiolytic decomposition of 3,4-benzpyrene in aqueous solutions. *High Energy Chemistry*. 2015;49(5):354–355.
6. Kaushanskii DA, Kuzin AM. *Radiatsionno-biologicheskaya tekhnologiya* [Radiation-biological technology]. Moscow: Energoatomizdat; 1984. 152 p. Russian.
7. Sakumoto A, Miyata T. Treatment of wastewater by radiation and conventional methods. *Radiation Physics and Chemistry*. 1984;24(1):99–115.
8. Korom SF. Natural denitrification in the saturated zone: A review. *Water Resources Research*. 1992;28(6):1657–1668.
9. Bronk DA, Steinberg DK. Nitrogen regeneration. In: Nitrogen in the Marine Environment. Elsevier: [publisher unknown]; 2008. p. 385–467.
10. Camargo JA, Alonso A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems. *Environment International*. 2006;32(6):831–849.
11. Ward MH, et al. Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(7):1557.
12. Xue Y, Wu Y, Chen Q. Seasonal variation and sources of nitrite in a large river system. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23:23833–23844.

Статья поступила в редколлегию 23.08.2025.
Received by editorial board 23.08.2025.

УДК 502.3:628.4(476)

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В СЕКТОРЕ «ОТХОДЫ» В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

И. И. ПОЛОЗ^{1), 2)}, О. И. РОДЬКИН³⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Беларусь

²⁾Институт жилищно-коммунального хозяйства, Национальная академия наук Беларуси,
ул. акад. Купревича, 10, 220141, г. Минск, Беларусь

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

В исследовании представлена оценка основных источников выбросов парниковых газов в секторе «Отходы» в Республике Беларусь в контексте глобального изменения климата и его воздействия на окружающую среду. Актуальность данной работы обусловлена растущими проблемами, связанными с управлением отходами, а также необходимостью снижения выбросов парниковых газов для достижения климатических целей, установленных международными соглашениями. С 1989 по 2019 г. среднегодовая температура в стране выросла на 1,3 °С. Прогнозы белорусских ученых указывают на дальнейшее повышение температуры (1–5 °С к концу века). Беларусь, являясь стороной Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН), Киотского протокола и Парижского соглашения, взяла на себя обязательство сократить выбросы парниковых газов (ПГ) на 28 % к 2030 г. по сравнению с уровнем 1990 г. Сектор «Отходы» является значительным источником ПГ, что связано с процессами утилизации, переработки и захоронения больших объемов отходов, образующихся в результате человеческой деятельности. Установлено, что основными источниками выбросов парниковых газов в данном секторе являются полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО) и сооружения для очистки сточных вод. На указанный сектор приходится 32,76 % от общего объема национальных выбросов метана (CH₄) и 4,17 % выбросов закиси азота (N₂O). Общий объем выбросов ПГ в секторе «Отходы» в 2020 г. – 5 829,72 Гг в CO₂-эквиваленте, что составляет 6,56 % от общих выбросов в стране. Полученные результаты подчеркивают важность разработки эффективных стратегий управления отходами для снижения выбросов парниковых газов и минимизации их воздействия на климатическую систему.

Ключевые слова: парниковые газы; изменение климата; сектор «Отходы»; твердые коммунальные отходы; сточные воды; МГЭИК.

ASSESSMENT OF THE MAIN SOURCES OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE WASTE SECTOR IN THE REPUBLIC OF BELARUS

I. I. POLOZ^{a, b}, A. I. RODZKIN^c

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

^bInstitute of Housing and Communal Services, National Academy of Sciences of Belarus,
10 Academician V. F. Kuprevicha Street, Minsk 220141, Belarus

^cInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: I. I. Poloz (uira@list.ru)

Образец цитирования:

Полоз ИИ, Родькин ОИ. Оценка основных источников выбросов парниковых газов в секторе «Отходы» в Республике Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;3:89–95.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-89-95>

For citation:

Poloz II, Rodzkin AI. Assessment of the main sources of greenhouse gas emissions in the Waste sector in the Republic of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;3:89–95. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-3-89-95>

Авторы:

Ирина Ивановна Полоз – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; доцент кафедры промышленного дизайна и упаковки¹⁾; ведущий научный сотрудник²⁾.
Олег Иванович Родькин – доктор биологических наук, профессор; директор.

Authors:

Irina I. Poloz, PhD (agriculture), docent; associate professor at the department of industrial design and packaging^a; leading researcher^b.
uira@list.ru
Oleg I. Rodzkin, doctor science (biology), professor; director.
aleh.rodzkin@rambler.ru

The article presents an assessment of the main sources of greenhouse gas emissions in the «Waste» sector in the Republic of Belarus in the context of global climate change and its impact on the environment. The relevance of this study is determined by the growing problems associated with waste management, as well as the necessity to reduce greenhouse gas emissions to achieve climate goals established by international agreements. From 1989 to 2019, the average annual temperature in the country increased by 1.3 °C. Predictions from Belarusian scientists forecast a further temperature rise of 1–5 °C by the end of the century. Belarus, as a party to the UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), the Kyoto Protocol, and the Paris Agreement, has committed to reducing greenhouse gas emissions by 28 % by 2030 compared to 1990 levels. The “Waste” sector is a significant source of greenhouse gases, related to the processes of disposal, recycling, and landfilling of large volumes of waste generated by human activities. It has been established that the main sources of greenhouse gas emissions in this sector are solid municipal waste landfills and wastewater treatment facilities. This sector accounts for 32.76 % of the total national methane (CH₄) emissions and 4.17 % of nitrous oxide (N₂O) emissions. The total volume of greenhouse gas emissions in the «Waste» sector in 2020 amounted to 5,829.72 Gg in CO₂-equivalent, which constitutes 6.56 % of the total emissions in the country. The results obtained highlight the importance of developing effective waste management strategies to reduce greenhouse gas emissions and minimize their impact on the climate system.

Keywords: greenhouse gases; climate change; waste sector; solid municipal waste; wastewater; IPCC.

Введение

Современная научная теория глобального изменения климата развивается с начала XIX в., когда впервые был установлен факт роста температуры, связанный с выбросами в атмосферу парниковых газов. К настоящему времени установлено, что увеличение средней температуры поверхности Земли (рост на 0,8 °C с середины XX в.) сопровождается рядом негативных экологических эффектов, включая изменение водного баланса территорий и воздушных потоков, таяние ледников, поднятие уровня мирового океана, выпадение кислотных осадков и др. [1]. Такой рост температуры превышает показатель, зафиксированный за последние полторы тысячи лет. Согласно теоретическим расчетам, основная причина процесса изменения климата – усиление парникового эффекта из-за роста концентрации CO₂ и ряда других газов в атмосфере вследствие деятельности человека.

Глобальная климатическая угроза для Беларуси также актуальна, как и для многих других стран. Так, в течение 1989–2019 гг. среднегодовая температура воздуха на территории Беларуси повысилась в среднем за данный период на 1,3 °C по сравнению с климатической нормой (1961–1990 гг.) и на 0,7 °C по сравнению с температурой за период 1945–2019 гг., что составило 7,1 °C [2].

Согласно климатическим моделям, разработанным белорусскими учеными, различные сценарии концентрации парниковых газов (далее – ПГ) прогнозируют повышение средней годовой температуры воздуха на 1–5 °C до конца текущего столетия. Наибольший рост на 1–6 °C прогнозируется в холодное время года, в теплое время года ожидается рост на 1–4 °C. Сценарий RCP8.5 демонстрирует наибольшие изменения. Зимой, весной и осенью ожидается повышение температуры до середины текущего столетия, а затем прогнозируется некоторое ее снижение до конца века [3].

В условиях глобального изменения климата проблема сокращения выбросов ПГ занимает одно из центральных мест в международной экологической повестке. Основным международным документом, регулирующим глобальное антропогенное воздействие на климат, является Рамочная конвенция ООН об изменении климата (UN Framework Convention on Climate Change, РКИК ООН), принятая 9 мая 1992 г. и вступившая в силу 21 марта 1994 г. Это соглашение об общих принципах совместных действий для сдерживания процессов изменения климата на планете. Республика Беларусь является Стороной РКИК ООН с 2000 г., Киотского протокола – с 2005 г., а также Парижского соглашения – с 2016 г. В связи с ратификацией Парижского соглашения по климату Беларусь взяла на себя международные обязательства по сокращению выбросов ПГ на 28 % до 2030 г. по сравнению с 1990 г. [4].

Согласно международным договоренностям, каждая Сторона конвенции должна представлять отчет по выбросам парниковых газов на своей территории в соответствии с методикой «Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов».

Выбросы ПГ представляют собой результат человеческой деятельности и охватывают несколько ключевых секторов, включая энергетику, промышленные процессы, сельское хозяйство, землепользование и управление отходами. Так, инвентаризация антропогенных выбросов и поглощений ПГ осуществляется по следующим секторам: 1) энергетика; 2) промышленные процессы и использование продуктов; 3) сельское хозяйство; 4) землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство (ЗИЗЛХ); 5) отходы. Методика расчета включает 4 сектора по выбросу парниковых газов и сектор, позволяющий адсорбировать парниковые газы, – ЗИЗЛХ.

Сектор «Отходы» является значительным источником парниковых газов, что связано с процессами утилизации, переработки и захоронения больших объемов отходов. При размещении твердых коммунальных отходов (далее – ТКО) на полигонах оказывается значительное негативное воздействие на окружающую

среду, в том числе и потому, что происходит выделение больших количеств метана и углекислого газа, являющихся ПГ и негативно влияющих на климатические изменения [5; 6].

Таким образом, изучение и снижение основных источников выбросов ПГ в секторе «Отходы» является важнейшей задачей для достижения целей Парижского соглашения и реализации национальных стратегий по климатической безопасности. Решение данной проблемы способствует не только снижению негативного воздействия на климат, но и развитию экологически безопасных и экономически эффективных методов обращения с отходами, что актуально для всех стран мира.

В связи с этим целью наших исследований является оценка, анализ и систематизация основных источников выбросов ПГ в секторе «Отходы».

Материалы и методы исследования

В работе использованы комплексные теоретические и аналитические подходы, основанные на изучении современных статистических отчетов, международных стандартов, программных документов и научных публикаций в области оценки выбросов ПГ в секторе «Отходы».

Теоретические основы исследования базируются на концепциях системного анализа процессов обращения с отходами, моделировании выбросов ПГ и оценке их вклада в климатическую систему. Проанализировано более 70 работ зарубежных и отечественных авторов.

Результаты исследования и их обсуждения

Согласно расчетам международной группы экспертов по изменению климата (далее – МГЭИК), основными причинами происходящих изменений являются выбросы ПГ, сопутствующие производству энергии и повышению средней глобальной температуры атмосферы, что обуславливает увеличение частоты природных стихийных бедствий и рост уровня Мирового океана [7; 8].

Согласно ISO 14067–2018, ПГ – это газовый компонент атмосферы природного или антропогенного происхождения, который поглощает и испускает излучение на определенных длинах волн в спектре инфракрасного излучения, испускаемого поверхностью Земли, атмосферой и облаками [9].

Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов 2006 г. охватывают следующие ПГ [10]:

- двуокись углерода (CO_2);
- метан (CH_4);
- закись азота (N_2O);
- гидрофторуглероды (ГФУ);
- перфторуглероды (ПФУ);
- шестифтористая сера (SF_6);
- трехфтористый азот (NF_3);
- трифторметил пятифтористая сера (SF_5CF_3);
- галогенированные эфиры (например, $\text{C}_4\text{F}_9\text{OC}_2\text{H}_5$, $\text{CHF}_2\text{OCF}_2\text{OC}_2\text{F}_4\text{OCHF}_2$, $\text{CHF}_2\text{OCF}_2\text{OCHF}_2$);
- другие галоидуглероды, не охваченные Монреальским протоколом, в том числе CF_3I , CH_2Br_2 , CHCl_3 , CH_3Cl , CH_2Cl_2 .

Многие специалисты-климатологи включают в число ПГ и водяной пар, поскольку его вклад в создание парникового эффекта оценивается достаточно высоко.

Углекислый газ является наиболее распространенным ПГ, образующимся в результате производства энергии. В октябре 2022 г. международная группа исследователей установила, что концентрация углекислого газа в атмосфере Земли достигла 418 ppm, что является самой высокой когда-либо зарегистрированной среднемесячной глобальной концентрацией [11]. Углекислый газ, попадая в атмосферу, задерживает инфракрасное излучение с поверхности планеты, что приводит к увеличению ее температуры, вызывая парниковый эффект [12]. Увеличение концентрации углекислого и других парниковых газов влечет за собой не только повышение температуры воздушной среды, но и нарушает климатический баланс биосферы.

Такого рода изменения могут привести к увеличению количества дождливых дней и ливневых осадков, изменению регионального климата, изменению сезонов и усилению экстремальных погодных условий.

Углекислый газ, попадая в атмосферу, остается там в течение длительного времени, способствуя глобальному потеплению в течение нескольких десятилетий или даже столетий.

Углекислый газ как продукт жизнедеятельности организмов и часть земного углеродного цикла (естественная циркуляция углерода в атмосфере, океанах, почве, растениях и животных) присутствует в атмосфере постоянно. Антропогенная деятельность также изменяет углеродный цикл, выбрасывая больше

CO₂ в атмосферу и изменяя способность таких естественных поглотителей, как леса и почвы, удалять и накапливать CO₂ из атмосферы. Углекислый газ попадает в атмосферу при сжигании ископаемых видов топлива (уголь, природный газ и нефть), твердых отходов, деревьев и изделий из древесины, а также в результате определенных химических реакций (например, при производстве цемента). Углекислый газ удаляется из атмосферы (или секвестрируется), когда он поглощается растениями в рамках биологического углеродного цикла [13].

Еще одним ПГ является метан. Выявлено, что современная глобальная интенсивность выбросов естественных источников метана составляет от 183 до 248 Тг CH₄/год при средней (наиболее вероятной) величине 215 Тг CH₄/год. Современная глобальная интенсивность антропогенных источников метана в атмосферу составляет 357 Тг CH₄/год с интервалом неопределенности от 336 до 375 Тг CH₄/год [14].

Оценки степени влияния метана на парниковый эффект, полученные различными исследователями, значительно варьируют. Согласно исследованиям [15], ПГ метана является более эффективным поглотителем инфракрасного излучения, чем углекислый газ. Потенциал глобального потепления метана в 28–36 раз больше, чем у углекислого газа, и поэтому он оказывает более серьезное воздействие на климат. Результаты исследований позволяют увеличить эту цифру более чем в 3 раза. Предполагается, что парниковый эффект от метана превосходит эффект от CO₂ в 84 раза. Следовательно, прирост содержания метана на 1 % дает вклад в парниковый эффект примерно в 84 раза более высокий, чем последствия от увеличения на 1 % содержания двуокиси углерода [16]. Потенциал метана как ПГ более чем в 80 раз превышает CO₂. Несомненно, эта цифра еще будет меняться по мере накопления новых данных наблюдений.

Основные антропогенные источники метана [13; 17–20].

Отходы. Захороненные на полигонах отходы являются значительным источником выброса метана, так как содержат много влажного органического материала и в результате создаются анаэробные условия, способствующие образованию этого газа с участием бактерий. Значительное количество метана также выделяется при производстве компостов, в том числе с использованием навоза.

Сточные воды. Обработка промышленных и бытовых стоков в биологических очистных сооружениях или отстойниках, где имеются анаэробные условия для развития метаногенных бактерий, также является источником выбросов метана.

Угольная промышленность. При добыче угля из месторождений в атмосферу поступает метан как непосредственно выделяющийся при добыче угля, так и получаемый при дегазации угольных пластов, а также из шахт, где прекращена добыча. Количество выделяемого газа может быть уменьшено при применении специальных технологий для его извлечения и утилизации.

Горение биомассы и топлива. При неполном сгорании органических веществ как при использовании топлива, так и при сжигании сельскохозяйственных остатков и других органических отходов также выделяется метан. Его основной глобальный источник находится в Африке, где широко практикуется сжигание соломы при подготовке почвы для нового урожая.

Добыча, переработка, транспортировка, хранение и распределение природного газа и нефти могут сопровождаться выбросами метана. Его источниками при этом являются негерметичные емкости для транспортировки и технологическая необходимость стравливания газа при проводимых ремонтах, пусках-остановках оборудования на производственных площадках и т. д.

Животноводство. Жвачные животные (коровы, овцы и козы) производят метан в процессе пищеварения.

Рисовые поля. Рисовые поля являются интенсивным источником метана, так как они значительное время покрыты водой, что создает благоприятные условия для развития анаэробных метаногенных бактерий. Считается, что газ поступает в атмосферу в основном через рисовые растения, так как без них аналогично обработанные поля дают поток метана примерно в 50 раз меньше.

Изменению климата и одновременно разрушению стратосферного озона способствуют выбросы оксида азота. На данный момент этот газ является третьим по степени воздействия на изменение климата соединением после углекислого газа и метана [21].

Закись азота естественным образом присутствует в атмосфере в рамках азотного цикла Земли и имеет множество природных источников. Однако деятельность человека (сельское хозяйство, сжигание ископаемого топлива, очистка сточных вод и промышленные процессы) увеличивает количество N₂O в атмосфере. Молекулы закиси азота остаются в атмосфере в среднем 114 лет, прежде чем попадают в поглотитель или разрушаются в результате химических реакций.

В соответствии с результатами анализа ключевых категорий выбросов ПГ в секторе «Отходы» выделяют следующие основные источники [22]:

5.А. Захоронение твердых отходов – основной источник выбросов метана.

5.В. Биологическая обработка твердых отходов приводит к выбросам метана и закиси азота.

5.C. Сжигание и открытое горение отходов – источники выбросов углекислого газа, метана и закиси азота.

5.D. Очистка и сброс сточных вод способствуют образованию метана и закиси азота.

В рамках группы 5.A. выделяются следующие источники:

5.A.1. Управляемые полигоны и свалки:

5.A.1.a. Анаэробные управляемые свалки.

5.A.1.b. Полуанаэробные управляемые свалки.

5.A.2. Неуправляемые свалки.

5.A.3. Свалки без определенной категории – случаи, когда отсутствуют данные о разделении отходов по объектам захоронения.

Выбросы от открытого сжигания отходов также включаются в категорию «5.C. Сжигание и открытое горение отходов».

В Республике Беларусь одной из стратегических целей государственной политики в сфере обращения с отходами является минимизация их негативного воздействия на окружающую среду и здоровье граждан, а также максимальное вовлечение отходов в хозяйственный оборот в качестве вторичных материальных ресурсов. По данным Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды, в 2023 г. в стране образовалось 3 933 тыс. т твердых коммунальных отходов, из которых лишь 34,4 % было использовано, а остальная часть отправлена на объекты захоронения.

Выбросы ПГ в системе обращения с отходами преимущественно представляют собой метан, который образуется в результате анаэробного разложения органических компонентов ТКО. На неуправляемых свалках, где отсутствует должный контроль за процессами разложения, выбросы метана могут значительно превышать нормы. Это связано с недостаточным мониторингом и отсутствием технологий его улавливания и переработки [23].

Биологическая обработка твердых отходов, включая компостирование и анаэробное разложение, также приводит к значительным выбросам ПГ. В процессе анаэробного разложения органических материалов в условиях недостатка кислорода образуется метан, который выделяется как на свалках, так и на установках для биологической обработки отходов. При компостировании могут также образовываться выбросы закиси азота.

Инсинерация и открытое сжигание отходов, которые содержат ископаемый углерод, например, пластмассу, является определяющим источником выбросов двуокиси углерода в секторе «Отходы». Процесс сжигания приводит к образованию углекислого газа, который, хотя и менее мощный по сравнению с метаном и закисью азота, все же вносит значительный вклад в общий объем выбросов ПГ.

Следует отметить, что открытое сжигание отходов может также приводить к выбросам токсичных веществ и других загрязняющих газов, что негативно сказывается на качестве воздуха и здоровье населения.

Очистка и сброс сточных вод представляют собой еще один источник выбросов ПГ в секторе «Отходы». Так, в процессе очистки сточных вод, особенно в анаэробных условиях, могут образовываться метан и закись азота. Эти выбросы происходят как на этапах биологической очистки, так и при разложении органических веществ в сточных водах.

Согласно Восьмому Национальному сообщению Республики Беларусь, общая эмиссия ПГ в Республике Беларусь в эквиваленте CO_2 без сектора «ЗИЗЛХ» составляла в 1990 г. 145 461,61 Гг в эквиваленте CO_2 и снизилась в 2020 г. по сравнению с 1990 г. до 88 802,06 Гг на 38,95 %. По сравнению с 2019 г. (92 183,17 Гг) произошло незначительное снижение на 3,67 %, главным образом за счет секторов «Энергетика» и «ППИИП».

В целом, по Беларуси в эмиссиях ПГ без учета сектора «ЗИЗЛХ» выбросы CO_2 составляют 65,98 %, выбросы CH_4 – 19,41 и N_2O – 14,35 %. К уровню 1990 г. это соотношение было соответственно 74,48 %, 14,33, 11,19 %.

Поглощение CO_2 происходит только в секторе «ЗИЗЛХ», что составило в 2020 г. 38 221,89 Гг.

Такие вещества, как ГФУ, ПФУ и SF_6 , в Беларуси не производятся. Они поступают в составе оборудования и не оказывают существенного влияния на общие выбросы ПГ в связи с их незначительным объемом использования.

Общий объем выбросов ПГ в секторе «Отходы» в 2020 г. составил 5 829,72 Гг в эквиваленте CO_2 . Основным источником выбросов парниковых газов являются выбросы, связанные с очисткой сточных вод как промышленных, так и коммунальных – 51,81 %. Значительным источником выбросов также являются ТКО, которые вывозятся для захоронения на полигоны. На их долю приходится 47,71 %. Остальные 0,48 % выбросов связаны со сжиганием промышленных отходов в печах [24].

Всего в секторе «Отходы» доля выбросов CH_4 от захоронения коммунальных отходов и от сточных вод составляет 32,76 % от общего объема национальных выбросов метана и 4,17 % от всех выбросов N_2O .

Заключение

Сектор «Отходы» представляет собой значительный источник антропогенных выбросов ПГ, оказывая существенное влияние на глобальное изменение климата. Проведенный анализ выявил, что основными источниками выбросов ПГ в данном секторе являются полигоны захоронения ТКО и установки очистки сточных вод. Захоронение ТКО является доминирующим источником метана (CH_4), который образуется в результате анаэробного разложения органической фракции отходов на полигонах. Кроме того, процесс очистки и сброса сточных вод также вносит значительный вклад в выбросы ПГ, генерируя как метан, так и закись азота (N_2O).

В 2020 г. общий объем выбросов от сектора «Отходы» в Республике Беларусь составил 5 829,72 Гг в эквиваленте CO_2 . При этом метан, образующийся в результате захоронения отходов и обработки сточных вод, составляет 32,76 %, а закись азота 4,17 % от суммарного объема выбросов по всем секторам. Эти данные подчеркивают необходимость разработки и реализации эффективных стратегий управления отходами с целью снижения антропогенных выбросов и минимизации их воздействия на климатическую систему.

Библиографические ссылки

1. Глобальная климатическая угроза и экономика России: в поисках особого пути. [Интернет; процитировано 17 августа 2025]. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Climate_Primer_RU.pdf.
2. Хомич ВС, редактор. *Разработать прогноз состояния окружающей среды Беларуси на период до 2035 года*. В: № ГР 20192690. Отчет о НИР (промежуточный). Минск: Институт природопользования НАН Беларуси; 2020. 315 с.
3. Данилович ИС, Логинов ВФ. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларуси. *Центральноазиатский журнал географических исследований*. 2021;1(2):35–48.
4. Родькин ОИ, Черненко ЕВ. Оценка выбросов парниковых газов при сжигании биотоплива. В: *Наука – образованию, производству, экономике. Материалы 16-й Международной научно-технической конференции*. Минск : БНТУ; 2018. Том 3. с. 211.
5. Верещак ЕВ, Тихонова ИО. Оценка выбросов парниковых газов при размещении твердых коммунальных отходов на полигонах. *Успехи в химии и химической технологии*. 2021;12:27–30.
6. Wunsch C, Tsybina A. Municipal solid waste management in Russia: potentials of climate change mitigation. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022;19:27–42.
7. IPCC – Climate Change 2013: The Physical Science Basis [Internet; cited 2025 August 13]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/262677624_IPCC_2013.
8. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018 / World Meteorological Organization. Geneva, 2019. [Internet; cited 2025 August 17]. Available from: https://environmental.migration.int/sites/g/files/tmzbd11411/files/documents/1233_en.pdf.
9. ISO 14067 Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification. First edition 2018-08. Geneva: [publisher unknown]; 2018. 47 p.
10. Игглестон ХС, Буэндия Л, Мива К. МГЭИК 2006. *Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов : Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. Отходы. Часть 1. Том 1*. Япония: ИГЕС; 2006.
11. World Scientists Warning of a Climate Emergency. *BioScience*. 2022;72(12):1149–1155.
12. Морев СЮ. Новые технологии утилизации углекислого газа как средства решения экологических проблем. В: Грачева ЕП, редактор. *Проблемы экологического образования в XXI веке: Труды III Международной научной конференции (очно-заочной), посвященной 100-летию педагогического института, г. Владимир, 6 декабря 2019 года*. Владимир: Владимирский государственный университет; 2019. с. 127–134.
13. Устойчивое развитие: экологические проблемы. В: *Сборник материалов IV региональной научно-практической конференции, г. Брест. 22 ноября 2012 года*. Брест: БрГУ им. А. С. Пушкина; 2013. 90 с.
14. Бондур ВГ, Мохов ИИ, Макоско АА. *Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты*. Москва: Российская академия наук; 2022. 389 с.
15. Ишков АГ. Роль метана в изменении климата. НИИПЭ, Неправительственный экологический фонд имени В. И. Вернадского. Москва: Российская экологическая академия; 2018. 135 с.
16. Плотникова ИН, Володин СА, Кочнева ЮЮ. *Актуальные вопросы декарбонизации. Часть 1*. Казань: Издательство «ФЭН» Академии наук РТ; 2021. 56 с.
17. *Современные глобальные изменения природной среды. Том 4. Факторы глобальных изменений*. Москва: Научный мир; 2012. 539 с.
18. Бажин НМ. Метан в атмосфере. *Соросовский образовательный журнал*. 2000;6(3):52–57.
19. Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, editors. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press; 2014. 1419 p.
20. Танырбердиева Н, Танырбердиева Э. Выбросы метана и их влияние на окружающую среду. *Вестник науки*. 2023;9(66):297–300.
21. Kanter D, Mauzerall DL, Ravishankara AR, A post-Kyoto partner: Considering the stratospheric ozone regime as a tool to manage nitrous oxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2013;110(12):4451–4457.
22. Мелех ДВ, Михалевич РВ, Наркевич ИП. Использование твердых коммунальных отходов в качестве альтернативных видов топлива для сокращения выбросов парниковых газов в секторах «Энергетика» и «Отходы» Республики Беларусь. *Труды БГТУ. Серия 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*. 2021;2(247):205–213.
23. Черанёва АА, Ильиных ГВ. Изменение объемов выбросов парниковых газов при централизации потоков твердых коммунальных отходов. *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2022;3:26–35.

24. Наркевич ИП, редактор. Ведение государственного кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов. В: № 56/7/1.3.1.6/2021. Отчет о выполнении работы по договору от 21.05.2021 г. Минск: Бел НИЦ «Экология»; 2021. с. 9–13.

References

1. Global Climate Threat and Russia's Economy. In Search of a Special Path. Basis [Internet; cited 2025 August 17]. Available from: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Climate_Primer_RU.pdf.
2. Khomich VS, editor. *Razrabotat' prognoz sostoyaniya okruzhayushchei sredy Belarusi na period do 2035 goda. V: otchet o NIR (promezhutochnyi)* [Develop a forecast of the environmental state of Belarus for the period until 2035. In: No. GR 20192690. Interim report on R&D]. Minsk: Institute of Natural Resource Management of the National Academy of Sciences of Belarus; 2020. 315 p. Russian.
3. Danilovich IS, Loginov VF. *Tekushchie i ozhidaemye izmeneniya klimata na territorii Belarusi* [Current and Expected Climate Changes on the Territory of Belarus]. *Central Asian Journal of Geographic Research*. 2021;1(2):35–48. Russian.
4. Rodkin OI, Chernienok EV. *Otsenka vybrosov parnikovyykh gazov pri szhiganii biotopliva* [Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Biomass Combustion]. In: Science – Education, Production, Economy. Materials of the 16th International Scientific and Technical Conference. Minsk: BNTU; 2018. Volume 3. p. 211. Russian.
5. Vereshchak EV, Tikhonova IO. *Otsenka vybrosov parnikovyykh gazov pri razmeshchenii tverdykh kommunal'nykh otkhodov na poligonakh* [Assessment of greenhouse gas emissions from the landfilling of municipal solid waste]. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2021;12:27–30. Russian.
6. Wünsch C, Tsybina A. Municipal solid waste management in Russia: potentials of climate change mitigation. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022;19:27–42.
7. IPCC – Climate Change 2013: The Physical Science Basis [Internet; cited 2025 August 13]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/262677624_IPCC_2013.
8. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018 / World Meteorological Organization. Geneva, 2019. [Internet; cited 2025 August 17]. Available from: https://environmentalmigration.iom.int/sites/g/files/tmzbd11411/files/documents/1233_en.pdf.
9. ISO 14067 Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification. First edition 2018-08. Genva: [publisher unknown]; 2018. 47 p.
10. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K. *MGEIK 2006. Rukovodystshchie printsipy natsional'nykh inventarizatsii parnikovyykh gazov* [IPCC 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories]: IPCC Program on National Greenhouse Gas Inventories. Waste. 2006. Volume 1, Part 1. Japan: IGES; 2006. Russian.
11. World Scientists Warning of a Climate Emergency. *BioScience*. 2022;72(12):1149–1155.
12. Morev SYu. *Novye tekhnologii utilizatsii uglekislogo gaza kak sredstva resheniya ekologicheskikh problem* [New Technologies for Carbon Dioxide Utilization as a Means of Addressing Environmental Issues]. In: Gracheva EP, editor. Problems of Environmental Education in the 21st Century. Proceedings of the III International Scientific Conference (Hybrid Format) Dedicated to the 100th Anniversary of the Pedagogical Institute, Vladimir, 2019 December 6. Vladimir: Vladimir State University. 2019. p. 127–134. Russian.
13. *Ustoichivoe razvitiye: ekologicheskie problemy* [Sustainable Development: Environmental Issues]. In: Collection of Materials from the IV Regional Scientific-Practical Conference. Brest. 2012 November 22. Brest: A. S. Pushkin Brest State University; 2013. 90 p. Russian.
14. Bondur VG, Mokhov II, Makosko AA. *Metan i klimaticheskie izmeneniya: nauchnye problemy i tekhnologicheskie aspekty* [Methane and Climate Change: Scientific Problems and Technological Aspects]. Moscow: Russian Academy of Sciences; 2022. 389 p. Russian.
15. Ishkov AG. *Rol' metana v izmenenii klimata* [The Role of Methane in Climate Change]. Research Institute of Industrial and Environmental Economics (NIIPÉ), V. I. Vernadsky Non-Governmental Ecological Foundation. Moscow: Russian Ecological Academy; 2018. 135 p. Russian.
16. Plotnikova IN, Volodin, SA, Kochneva YuYu. *Aktualnyye voprosy dekarbonizatsii. Chast' I* [Current Issues of Decarbonization. Part 1]. Kazan: «FEN» Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; 2021. 56 p. Russian.
17. *Sovremennyye global'nye izmeneniya prirodnoi sredy* [Modern Global Changes in the Natural Environment]. Part 4. Factors of Global Change. Moscow: Nauchnyi Mir; 2012. 539 p. Russian.
18. Bazhin NM. *Metan v atmosfere* [Methane in the Atmosphere]. *Soros Educational Journal*. 2000;6(3):52–57. Russian.
19. Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, editors. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press; 2014. 1419 p.
20. Tanyrberdieva N, & Tanyrberdieva E. *Vybrosy metana i ikh vliyaniye na okruzhayushchuyu sredu* [Methane Emissions and Their Impact on the Environment]. *Science Herald. International Scientific Journal*. 2023;9(66):297–300. Russian.
21. Kanter D, Mauzerall DL, Ravishankara AR, A post-Kyoto partner: Considering the stratospheric ozone regime as a tool to manage nitrous oxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2013;110(12):4451–4457.
22. Melekh DV, Mikhalevich RV, & Narkevich IP. *Ispol'zovanie tverdykh kommunal'nykh otkhodov v kachestve al'ternativnykh vidov topliva dlya sokrashcheniya vybrosov parnikovyykh gazov v sektorakh «Energetika» i «Otkhody» Respubliki Belarus* [The Use of Municipal Solid Waste as Alternative Fuels to Reduce Greenhouse Gas Emissions in the «Energy» and «Waste» Sectors of the Republic of Belarus]. *Proceedings of BSTU. Serie 2, Chemical Technology, Biotechnology, Geoecology*. 2021;2(247):205–213. Russian.
23. Cherenova AA, & Ilinykh GV. *Izmenenie ob'ёмov vybrosov parnikovyykh gazov pri tsentralizatsii potokov tverdykh kommunal'nykh otkhodov* [Changes in Greenhouse Gas Emission Volumes from the Centralization of Municipal Solid Waste Streams]. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2022;3:26–35. Russian.
24. Narkevich IP, editor. *Vedenie gosudarstvennogo kadastra antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovyykh gazov. № 56/7/1.3.1.6/2021. Otchet o vypolnenii raboty po dogovoru ot 21.05.2021 g.* [Maintenance of the State Cadastre of Anthropogenic Emissions from Sources and Absorption by Sinks of Greenhouse Gases. In: No. 56/7/1.3.1.6/2021. Report on the Work Performed under Contract dated 21.05.2021]. Minsk: RUE «BelNIC «Ecology»; 2021. p. 9–13. Russian.

Статья поступила в редколлегию 26.08.2024.
Received by editorial board 26.08.2024.

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Жаббаров З. А., Абдрахманов Т., Джалилова Г. Т., Махаммадиев С. К., Абдуллаев Ш. З., Имомов О. Н., Закирова С. К., Махкамова Д. Ю., Абдукаримов Ж. Ж.</i> Влияние Каттакурганского водохранилища на почвенный покров и процесс гидроморфизма	4
<i>Макаренко Т. В., Пырх О. В., Хаданович А. В., Макаренко А. И.</i> Динамика накопления соединений свинца и меди в системе «донные отложения – двустворчатые моллюски»	21
<i>Кононович Я. П., Шулинский Р. С., Бондаренко В. Ю., Жоров Д. Г., Воронова-Барте Н. В.</i> Молекулярная характеристика пяти геномов <i>Buchnera aphidicola</i> – облигатного симбионта тлей фауны Беларуси	34
<i>Каленчук Т. В., Чернецкая А. Г.</i> Содержание экзогенных и эндогенных брассиностероидов в луковичных культурах родов <i>Tulipa</i> и <i>Hyacinthus</i>	42

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Гарбарук Д. К., Воронцовская А. Н., Шумак С. В., Турчин Л. М., Углянец А. В.</i> Краткосрочные изменения загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr элементов биогеоценозов высоковозрастных дубрав в зоне эвакуации (отчуждения) Чернобыльской АЭС	51
<i>Цыбулько Н. Н., Герменчук М. Г., Журавков В. В., Дюбайло О. В.</i> Радиоактивное загрязнение территории Беларуси: динамика, современное состояние и долгосрочный прогноз.....	67

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Гаит М. С. И., Сыса А. Г., Живицкая Е. П.</i> Концентрационно-зависимое повышение уровня мРНК <i>CYP1A1</i> и <i>CYP1B1</i> под действием фенобарбитала в лимфоцитах периферической крови человека.....	76
--	----

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Мамедов Х. Ф., Хасаева С. Г.</i> Химические механизмы образования нитритов и химические аспекты загрязнения	82
<i>Полоз И. И., Родькин О. И.</i> Оценка основных источников выбросов парниковых газов в секторе «Отходы» в Республике Беларусь	89

CONTENTS

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Jabbarov Z. A., Abdrakhmanov T., Jalilova G. T., Mahammadiev S. K., Abdullaev Sh. Z., Imomov O. N., Zakirova S. K., Makhkamova D. Ju., Abdukarimov J. Zh.</i> Influence of the Kattakurgan reservoir on soil cover and hydromorphism process.....	4
<i>Makarenko T. V., Pyrkh O. V., Khadanovich A. V., Makarenko A. I.</i> Dynamics of accumulation of lead and copper compounds in the system «bottom sediments – bivalve mollusks»	21
<i>Kananovich Ya. P., Shulinski R. S., Bandarenka U. Yu., Zhorov D. G., Voronova-Barte N. V.</i> Molecular characteristics of five genomes of <i>Buchnera aphidicola</i> – an obligate symbiont of aphids in the fauna of Belarus	34
<i>Kalenchuk T. V., Chernetskaya A. G.</i> Content of exogenous and endogenous brassinosteroids in bulbous crops of the genera <i>Tulipa</i> and <i>Hyacinthus</i>	42

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Garbaruk D. K., Voronetskaya A. N., Shumak S. V., Turchin L. M., Uglyanets A. V.</i> Short-term contamination changes of ^{137}Cs and ^{90}Sr in ecosystems elements of high-age oak forests in the Chernobyl nuclear power plant exclusion zone	51
<i>Tsybulka M. M., Germenchuk M. G., Zhuravkov V. V., Dubaylo O. V.</i> Radioactive contamination of the territory of Belarus: dynamics, current state and long-term forecas	67

MEDICAL ECOLOGY

<i>Ghaith M. S. I., Sysa A. G., Zhyvtskaya E. P.</i> Concentration-dependent upregulation of <i>CYP1A1</i> and <i>CYP1B1</i> mRNA by phenobarbital in human peripheral blood lymphocytes.....	76
---	----

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Mammadov Kh. F., Khassayeva S. G.</i> Chemical mechanisms of nitrite formation and chemical aspects of pollution	88
<i>Poloz I. I., Rodzkin A. I.</i> Assessment of the main sources of greenhouse gas emissions in the Waste sector in the Republic of Belarus	89

Журнал включен Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований по биологическим, сельскохозяйственным и техническим (экология) наукам.

Журнал включен в библиографическую базу данных научных публикаций «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

**Журнал Белорусского
государственного университета. Экология.
№ 3. 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 25.06.2025.
Тираж 100 экз. Заказ 574.

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

© БГУ, 2025

**Journal
of the Belarusian State University. Ecology.
No. 3. 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 25.06.2025.
Edition 100 copies. Order number 574.

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

© BSU, 2025