



ЖУРНАЛ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ЭКОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

ECOLOGY

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

1

2023

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 632.69

РОЮЩАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КРОТА ОБЫКНОВЕННОГО В УСЛОВИЯХ БЕЛАРУСИ И НЕОБХОДИМОСТЬ ЕГО ОТПУГИВАНИЯ

Ю. С. ДУБНОВИЦКИЙ¹⁾, О. Г. ГОРОВЫХ²⁾, Н. В. ЖУКОВ³⁾, К. Ф. САЕВИЧ⁴⁾

¹⁾Белорусский государственный аграрный технический университет,
пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь

²⁾Минский городской технопарк, «Белспецкомплект»,
ул. Солтыса, 187, 220070, г. Минск, Беларусь

³⁾Центральный Ботанический сад Национальной академии наук Беларуси,
пр. Независимости, 80, 220012, г. Минск, Беларусь

⁴⁾Белорусский государственный экономический университет, Партизанский пр., 26, 220070, г. Минск, Беларусь

В исследовании представлены данные охотничьего промысла на крота в нашей стране в прошлом веке. Указаны факторы, способствующие повышению численности его популяции в настоящее время: отсутствие естественных врагов, достаточность кормовой базы в течении всего года, отсутствие промышленного отлова. Приведены новые

Образец цитирования:

Дубновицкий ЮС, Горовых ОГ, Жуков НВ, Саевич КФ. Роющая деятельность крота обыкновенного в условиях Беларуси и необходимость его отпугивания. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;1:4–11.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-4-11>

For citation:

Dubnovitsky YuS, Gorovykh OG, Zhukov NV, Saevich KF. Digging activity of the common mole under the conditions of Belarus and the need for its scaring. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;1:4–11. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-4-11>

Авторы:

Юрий Семенович Дубновицкий – старший преподаватель кафедры управления охраной труда.
Ольга Геннадьевна Горовых – кандидат технических наук, доцент; начальник лаборатории.
Николай Васильевич Жуков – эколог, охотовед-орнитолог.
Константин Федорович Саевич – доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры физикохимии материалов и производственных технологий.

Authors:

Yuri S. Dubnovitsky, senior lecturer at the department of labor protection management.
dubprof@mail.ru
Olga G. Gorovykh, PhD (engineering), docent; head of the laboratory.
olgredda@tut.by
Nikolai V. Zhukov, ecologist, hunter-ornithologist.
Konstantin F. Saevich, doctor of science (biology), professor; professor at the department of physical chemistry of materials and production technologies.
saevich@tut.by

данные по средним размерам кротовин: диаметр $D_{кр} = 28 \pm 2$ см, высота $H_{кр} = 9,7 \pm 0,6$ см, а также их количество на исследуемых участках Пружанского р-на. На основе данных подсчета кротовин в Дзержинском, Столбцовском, Узденском, Пружанском и Пинском р-нах на участках, находящихся под естественными травами или засеянных злаковыми культурами. Установлено среднее количество кротовин в Брестской обл., в которое входит 36 единиц (средняя площадь $2,2 \text{ м}^2$) на участке $10 \times 10 \text{ м}^2$, что составляет около 2 % от общей площади. Определена примерная площадь (21,5 тыс. га), находящаяся под кротовинами в Брестской обл. Рассмотрено влияние крота на количество переработанной земли и связанной с этим гумусообразованием в зависимости от интенсивности отлова. Показано, сколько могло бы быть переработано земли не съеденными кротами дождевыми червями в период их промышленного отлова, что привело к снижению массы генерируемого червями гумуса, в частности, в 1975 г. эта величина составила 15,202 млн т грунта. Отмечена необходимость в отпугивании кротов, хотя бы с территорий интенсивного посещения людьми и домашними животными (садово-огородные участки) в связи с высокой зараженностью кротов эктопаразитами, опасными для человека и животных. Приведена информация о новом разработанном в Беларуси и освоенном к выпуску отпугивателе для кротов на основе дигидрата сульфата кальция, который не содержит ядохимикаты и не приводит к гибели животных, однако способствует покиданию той территории, которая обработана данным отпугивателем для кротов.

Ключевые слова: крот обыкновенный; кротовые выбросы (кротовины); ущерб; дождевые черви.

DIGGING ACTIVITY OF THE COMMON MOLE UNDER THE CONDITIONS OF BELARUS AND THE NEED FOR ITS SCARING

Yu. S. DUBNOVITSKY^a, O. G. GOROVYKH^b, N. V. ZHUKOV^c, K. F. SAEVICH^d

^aBelarusian State Agrarian Technical University, 99 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220023, Belarus

^bMinsk City Technopark, «Belspetskomplekt», 187 Soltysa Street, Minsk 220070, Belarus

^cCentral Botanical Garden, National Academy of Sciences, 80 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220012, Belarus

^dBelarusian State Economic University, 26 Parcizanski Avenue, Minsk 220070, Belarus

Corresponding author: O. Gorovых (olgreда@tut.by)

The article presents the data of hunting for the mole in the republic in the last century, during the period when the hunting for the mole was carried out, the factors contributing to the increase in the number of the mole population at the present time are indicated: the absence of natural enemies, the adequacy of the food supply throughout the year, the lack of industrial catching. New data on the average size of molehills are given: diameter $D_{cr} = 28 \pm 2$ cm, height $H_{cr} = 9.7 \pm 0.6$ cm and their number in the studied areas of the Pruzhany region. Based on the data of counting molehills in Dzerzhinsky, Stolbtsovsky, Uzdensky, Pruzhany and Pinsk districts in areas under natural grasses or sown with cereal crops, an average number of molehills in the Brest region was established, which amounted to 36 molehills (average area 2.2 m^2) per plot $10 \times 10 \text{ m}^2$, which is about 2 % of the total area. An approximate area was determined, amounting to 21.5 thousand hectares, located under molehills in the Brest region. The influence of the mole on the amount of processed land and the humus formation associated with this, depending on the intensity of catching, is considered; this year, this value amounted to 15.202 million tons of soil. The need to scare away moles, at least from areas of intensive visitation by people and domestic animals (garden plots) was noted due to the high infection of moles with ectoparasites dangerous to humans and animals. Information is provided on a new mole repeller developed in Belarus and mastered for production, based on calcium sulfate dihydrate, which does not contain pesticides and does not lead to the death of animals, but helps to leave the territory treated with this mole repeller.

Keywords: common mole; wormholes; damage; earthworms.

Введение

До 1980-х годов крота в большом количестве отлавливали для изготовления меховых изделий. Мех крота высоко ценился (и ценится) благодаря достаточной прочности и грязеотталкивающим свойствам, не имеющим по этому показателю аналогов, поэтому кроты являлись промысловыми животными, их мех прочнее, чем мех кролика или зайца [1]. Промысел крота интенсивно проводился начиная с 1920-х гг. По данным Международного независимого эколого-политологического университета, в 1935 г. на территории СССР было добыто 31 млн шкурок крота [2]. В начале 1990-х гг. только в одной Псковской обл. заготовки этого пушного зверя колебались от 101,5 до 743,3 тыс. шкурок в год. Как утверждал автор журнала «Уральский следопыт», до 1932 г. ежегодная добыча крота на Урале составляла 10–15 тыс. шкурок, но уже в 1934 г. эта цифра достигала уже более 1 млн штук. Заготовка кротов в послевоенные годы в среднем составляла 20–25 % всего пушного выхода в Беларуси [3]. За сезон старая самка может принести два помета по 7–9 детенышей, при наличии достаточной кормовой базы выживаемость молоди высокая. Естественных врагов у зверька почти нет, его не едят ни кошки, ни собаки – отпугивает сильный мускусный запах. Даже при поимке крота, они его выбрасывают. Употребляют кротов в пищу только немногие хищные млекопитающие:

лисица, лесной хорь и другие мелкие куньи. Но если они не очень голодны, то бросают задушенного зверька. Несколько чаще поедают кротов хищные птицы (канюк, малый подорлик, коршуны, а также некоторые совы, аисты, врановые). Однако хищники не оказывают существенного влияния на динамику численности кротов. Отлов более существенно сказывался на численности их популяции, по сравнению с его уничтожением естественными врагами, поэтому крот практически не встречался на садово-огородных участках в период его отлова до 1980-х гг. С 1980-х гг. заготовка пушнины крота в Беларуси прекратилась, и рост популяции кротов стал вызывать беспокойство, особенно на частных подворьях. Известны различные методы избавления приусадебных участков от кротов: а) применение химических средств, приводящих к гибели животного; б) отлов с применением кротоловков; в) отпугивание различными методами: ультразвуком, вибрацией, сильно пахучими веществами; г) газация нор; д) механические ограждения.

Применение химических средств для уничтожения сельскохозяйственных вредителей отравляет почву и растения ядохимикатами, поэтому внесение их в почву не желательно, поскольку одновременно подвергается опасности домашние животные, птицы, дети, а погибшие от отравления в недоступных местах и не убранные своевременно зверьки представляют дополнительную экологическую опасность.

Отлов – метод трудоемкий, длительный, требует работы опытных специалистов, часто не эффективный не только из-за применения некачественных кротоловков, но и от известной способности кротов избегать ловушек, которые ставят им в норы. Кроты засыпают землей подходы к ловушкам и прорывают вокруг них обходные ходы [4]. Также требует решения вопрос о дальнейшей судьбе пойманных зверьков. Если крот пойман, то вскоре данная территория вновь заселится уже другими кротами.

Считается, у крота слух настолько чувствителен [5], что применение ультразвуковых устройств способно являться тем раздражителем, который вынудит крота покинуть место его пребывания¹. Эффективное отпугивание с помощью ультразвука требует дорогого оборудования. Недостатком способа является то, что в окружности зоны распространения звуковых волн не должно быть никаких препятствий, например в виде больших камней или пустот, поскольку это снижает эффективность воздействия. Поэтому для достижения лучших результатов производителем рекомендуется устанавливать на участке несколько таких отпугивателей на расстоянии 30–40 м друг от друга. Кроме того, исследования органа слуха крота, проведенные Г. Н. Симкиным², показали, что слуховая система обитающих под землей животных приспособлена к восприятию главным образом низкочастотных звуков. У обыкновенного крота она наиболее чувствительна к звукам частотой 0,4; 0,7 и 2–4 килогерца. Таким образом, ультразвук не может являться эффективным отпугивателем по причине не слышимости его кротами.

Вибрация приводит к покиданию данной территории червями (установлено еще Ч. Дарвином [6]), а вслед за ними и кротов, так как отсутствует их основная пища. Но снижение количества червей на данном участке приводит к снижению образуемого ими гумуса, что также не является положительным результатом. Кроме того, важной особенностью чувства прикосновения является то, что при постоянном действии раздражителя последний быстро перестает ощущаться живым объектом [4].

У крота очень чувствительное обоняние [7] (крот чует дождевого червя через слой почвы до 60 см). На этом основано отпугивание их с применением репеллентов, обладающих непереносимым для грызунов запахом^{3,4,5}, что создает неудобства также для людей и приводит к загрязнению почвы и воздуха небезопасными химическими веществами. А такие отпугивающие средства, как керосин, бензин, уксус и т. д. имеют один общий недостаток – быстро выветриваются, поскольку обладают высокой летучестью, и, как результат, кроты возвращаются на ранее обработанный участок.

При видимом обилии средств борьбы с кротами, известным сегодня, проблема избавления от этих животных не становится менее острой. Но все же наиболее гуманным методом отпугивания кротов является воздействие репеллентами.

Дождевые черви – основная пища крота, мелиорируют и структурируют почву. За летний период популяция из 50 червей в пахотном слое почвы на 1 м² прокладывает километр ходов (что суммарно больше, чем общая протяженность кротовых ходов на такой же площади) и выделяет на поверхность копролиты слоем 3 мм. Еще больше их остается в толще почвы. Каждый червь пропускает через пищеварительный канал за сутки количество почвы, равное массе его тела⁶. Открыты и новые грани деятельности дождевых

¹Щербань Г. А., Крупский С. А. Способ отпугивания кротов и других земляных вредителей. Патент РФ на изобретение № 2673177/23.06.2017. Опубл. 22.11.2018.

²Слух у крота [Электронный ресурс]. URL: <https://pim7.info/sluh-u-krota/?ysclid=19xwr1h3m1964100277> (дата обращения: 10.10.2022).

³Загорулько Н. А., Битков А. А. Устройство для использования жидкого безводного аммиака для истребления вредных грызунов. Патент РФ на изобретение № 2132132/15.12.1997. Опубл. 27.06.1999.

⁴Гафт Я. З., Яковина Е. Р. Устройство для борьбы с кротами. Патент РФ на изобретение № 181972/10.10.2017. Опубл. 31.07.2018.

⁵Морозов С. В. Устройство для отпугивания грызунов и окуливания растений. Патент РФ на изобретение № 151003/30.09.2014. Опубл. 20.03.2015.

⁶Kobayashi Shinkichi. Mole repellent. Patent JP № S61238707-A/17.04.1985.

червей. Они способны снижать длительно сохраняющиеся возбудители заболеваний в почве, например возбудителей сибирской язвы [8].

Однократный прием пищи у крота составляет примерно 20 г. Прием пищи осуществляется примерно каждые пять часов. За сутки этот зверек съедает столько пищи, сколько весит сам, а иногда и больше. Голодать крот не может, 17–18 ч без еды для него губельны [9]. Количество корма, поедаемого за сутки, превышает собственный вес на 15–25 % или равно ему (80–100 г). Питаются кроты в основном дождевыми червями (до 70–90 % рациона). В Беларуси самцы отличаются от самок более крупными размерами, хотя в других регионах самцы почти неотличимы от самок [10]. Средняя масса самцов 95 г, самок 75 г [11].

Совпадение факторов, влияющих на размер популяции кротов (отсутствие отлова, отсутствие естественных врагов, достаточность кормовой базы), привело к тому, что численность их выросла до таких размеров, что приняла значительные масштабы и это уже сказывается на потерях в сельском хозяйстве, в том числе на гумусообразование и, как следствие, на плодородие почвы. По результатам анкетного опроса специалистов сельского хозяйства в 1986–1988 гг., потери урожая озимых и пропашных культур не превышают 1,0–1,5 %. В противоположность этому в теплицах, на ягодных плантациях, в молодых садах и лесопитомниках, на огородах даже при незначительном заселении кротом ущерб может быть значительным.

Цель исследования: оценить вред, оказываемый кротами сельскому хозяйству и культурным ландшафтам Беларуси.

Влияние, оказываемое кротами, рассматривали по таким показателям, как площадь земли, выведенная из оборота за счет образования кротовин, гумусообразование.

Европейский крот, или обыкновенный крот (*Talpa europaea*) – млекопитающее семейства кротовых отряда насекомоядных. Название «крот» буквально обозначает «копатель». Семейство кротовых включает около 20 видов. Все виды и подвиды кротов похожи друг на друга, а отличаются величиной и строением зубов, скелета и некоторыми особенностями образа жизни. По размерам тела, черепа и особенно структуре зубной системы кроты, распространенные на территории Беларуси, относятся к подвиду южнорусский крот (*Talpa europaea brauneri Satun*). Он отличается несколько меньшими размерами тела и черепа [12]. Крот имеет 44 зуба с верхними хорошо развитыми клыками. Глаза у крота слабо развиты, однако, слух у зверька хороший. Ещё лучше развито обоняние благодаря осязательным волоскам, разбросанным по всему телу, что позволяет чувствовать присутствие дождевых червей через значительный слой почвы (до 60 см). мех покрывает все тело, кроме лап, подошв, кончика хвоста и хоботка, не пропускает влагу и не мешает кроту двигаться в тесных подземных ходах.

Как отмечает И. Н. Сержанин [12], наибольшее количество крота наблюдалось в Витебской области, наименьшее в Брестской. Причем по сравнению с 1932–1939 гг. в 1948–1952 гг. выход крота (количество кротовин на единице площади) увеличился в 3–4 раза.

Места обитания и численность крота в основном зависят от достаточности кормовой базы – обилия почвенных беспозвоночных и пригодности почвы для передвижения. В связи с этим крот предпочитает угодья с мягким влажным грунтом – лесные поляны, опушки смешанных и лиственных лесов, луга. Крот одиночное животное. Один крот занимает участок примерно 100 м².

Урон сельскому хозяйству от деятельности кротов выражается не только в потерях зерна (люцерны, гороха, фасоли), рассады, свеклы и капусты, семян газонных трав, но и в снижении продуктивной деятельности дождевого червя – основного генератора гумуса [13].

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на территории Минской (эффективность действия средства отпугивания на кротов), а также в Брестской областях (количество и размер кротовин), в Борисовском, Дзержинском, Столбцовском, Узденском, Пружанском и Пинском р-нах на участках как находящихся под естественными травами, так и на засеянных злаковыми культурами.

Размеры кротовин определяли на участках размером 20 × 20 м². На данных участках проводили диагональ и вдоль нее линейным измерительным инструментом замеряли размеры (диаметр и высота) 11 кротовин. Учет кротовых выбросов на участках вдоль дорог проводили с отступлением 2 м от дорожного покрытия.

Общее количество кротовин определяли путем простого подсчета их на участках размером 10 × 10 м².

По результатам средообразующей деятельности крот отличается от остальных представителей насекомоядных и от мышевидных грызунов не просто прокладкой норной сети, но и образованием почвенных выбросов и приповерхностных тоннелей (ходовых валиков). Статистическую обработку полученных результатов измерений проводили в соответствии с ГОСТ 8.207-76.

Площадь среднего кротового выброса определяли по формуле (1):

$$S_{\text{ср}} = \pi R_{\text{кр}}^2 \text{ м}^2, \quad (1)$$

где $R_{\text{кр}}$ – средний радиус кротовины, м.

Общая площадь кротовых выбросов определялась по формуле (2)

$$S_{\text{об}} = S_{\text{кр}} \cdot N \text{ м}^2, \quad (2)$$

где N – число кротовых выбросов на участке, шт.

Общий объем вытолкнутой на поверхность почвы $V_{\text{об}}$ определяли, приняв в расчет, что кротовый выброс имеет правильную коническую форму с высотой конуса, равной средней высоте кротовин, а диаметр основания конуса – диаметру кротовины:

$$V_{\text{об}} = V_{\text{кр}} \cdot N = V_{\text{кр}} = \frac{1}{3}\pi \cdot R_{\text{кр}}^2 \cdot H_{\text{кр}} \cdot N, \quad (3)$$

где $V_{\text{кр}}$ – средний объем кротового выброса, м^3 ;

$H_{\text{кр}}$ – средняя высота кротового выброса, м.

Количество червей, не съеденных отловленными кротами, определяли по формуле (4)

$$N_{\text{чер}} = (N_{\text{кр}} \cdot m_{\text{кр}} \cdot 365) / 0,5, \quad (4)$$

где $N_{\text{кр}}$ – количество отловленных в год кротов, шт.;

$m_{\text{кр}}$ – средняя масса одного крота в Беларуси, приравненная к массе съеденных червей, г;

365 – количество дней питания крота в году;

0,5 – средняя масса одного червя, г.

Статистическую обработку полученных результатов измерений проводили в соответствии с ГОСТ 8.207-76.

Результаты исследования и их обсуждение

Размеры кротовых выбросов в д. Ясень Пружанского р-на, Брестской обл. на участках под естественными травами представлены в табл. 1. До этого данная территория использовалась в сельском хозяйстве в течение 70 лет.

Таблица 1

Размеры кротовых выбросов на обследованных участках Пружанского района

Table 1

Sizes of molehills in the surveyed areas of the Pruzhan region

Участок 1		Участок 2		Участок 3		Участок 4		Участок 5	
D, см	H, см	D, см	H, см	D, см	H, см	D, см	H, см	D, см	H, см
18	6	33	11	19	7	34	10	37	13
16	8	20	7	19	8	30	10	31	8
35	11	25	8	16	6	34	13	38	11
22	6	38	13	23	8	20	7	38	13
23	8	14	6,5	25	9	24	8	38	11
31	9	12	6 (min)	34	12	39	13	37	13
29	12	11 (min)	6 (min)	26	10	35	13	24	11
31	13	29	8	34	11	26	9	39	12
33	13	26	7	40 (max)	10	25	9	30	14 (max)
23	11	27	7	35	11	34	12	30	10
35	12	34	11	31	8	33	11	39	12

Средние размеры кротовин, вычисленные на основе данных табл. 1, следующие: диаметр $D_{\text{кр}} = 28 \pm 2$ см, высота $H_{\text{кр}} = 9,7 \pm 0,6$ см.

Максимальный диаметр кротового выброса равен $D_{\text{крmax}} = 40$ см, что на 20 % меньше, чем указанное в [14], и равное 50 см, а максимальная высота $H_{\text{крmax}} = 14$ см (на 44 % ниже высоты, ранее зафиксированной в литературе и равной 25 см [14]). Кротовые выбросы в Псковской обл. вообще достигают размеров в диаметре 71 см и 35 см высотой [15]. Факт небольших кротовин в Беларуси можно объяснить: 1) меньшими размерами самого подвида южнорусского крота (*Talpa europaea brauneri* Satun), проживающего на территории Беларуси; 2) более мягком грунте, что позволяет его частично вдавливать в боковые стенки; 3) пониженной текучести вытолкнутого грунта, что не дает ему растекаться и занимать большую площадь, при одной и той же массе.

Минимальные размеры кротовых выбросов следующие: диаметр $D_{\text{крmin}} = 11$ см, высота $H_{\text{крmin}} = 6$ см.

Площадь среднего кротового выброса по (1) равна

$$S_{cp} = \pi R_{кр}^2 = 3,14 \cdot (28/2)^2 = 615 \text{ см}^2.$$

На исследованном в апреле 2022 г. участке в д. Ясень площадью 0,57 га было обнаружено 745 кротовых выбросов, общая площадь кротовых выбросов по (2) составила 46 м².

$$S_{об} = S_{cp} \cdot N = 615,4 \cdot 745 = 458502 \text{ см}^2 \approx 46 \text{ м}^2.$$

Таким образом, общее количество кротовин и, соответственно, площадь, изъятая из посевов, составила 0,82 % (46,8·100/5700) от площади обследованного участка. Это хорошо соотносится с данными, полученными ранее другими авторами [16].

Общий объем вытолкнутой на поверхность почвы $V_{об}$ составил по (3):

$$V_{кр} = \frac{1}{3} \pi \cdot R^2 \cdot H = \frac{1}{3} \cdot 3,14 \cdot 14^2 \cdot 9,7 = 1989,9 \text{ см}^3,$$

$$V_{об} = V_{кр} \cdot 745 = 1989,9 \cdot 745 = 1482492,4 \text{ см}^3 \approx 1,5 \text{ м}^3.$$

Таким образом на поверхность на анализируемом участке было перемещено 1,5 м³ грунта с нижних горизонтов. Причем в поднятых на поверхность земли кротовых выбросах встречались камни размером до 10 см, появление которых сказывается на всхожести и на приживаемости растений.

В Дзержинском р-не возле р. Уса на участке размером 10×10 м² было учтено 58 кротовин, в Узденском р-не в д. Каменка – 48 кротовин, возле д. Зеньковичи – 34 кротовины, в Пинском р-не возле д. Лопатино – 16 кротовин, возле д. М. Дубрава – 24 кротовины.

Среднее количество кротовин на участке размером 10×10 м² в Брестской обл. составило 36 единиц, занимая площадь 2,2 м². Учитывая, что общая посевная площадь сельскохозяйственных культур в 2022 г. в Брестской обл. в хозяйствах всех категорий (включая подсобные) составила 978,9 тыс. га, можно предположить, что примерно 21,5 тыс. га находилось под кротовинами.

Более интересно оценить количество недовоспроизведенного гумуса, создаваемого дождевыми червями, в результате уничтожения их кротами. Для расчетов использовали данные указанные в [17].

Учитывая, что количество самок и самцов 1:1, можно принять среднюю массу крота в Беларуси 85 г, тогда в день крот съедает не менее 85 г (max 106 г) червей или в год 31,025 кг (85·365). Расчет произвели на 365 дней в году, поскольку кроты имеют годовую активность.

Таким образом, если взять количество зверьков, отловленных в разные периоды промысла и соотнести количество не съеденных ими дождевых червей, то можно определить количество биогумуса, который был сгенерирован данными не съеденными дождевыми червями.

Согласно данным, приведенным в [18], известно, что средняя масса червя 0,5 г. При количестве их 50 особей на 1 м² (500000 на 1 га) за сутки на площади 1 га ими перерабатывается 250 кг почвы. В средней полосе активная деятельность червей продолжается 200 дней в году. Следовательно, за сезон они могут перерабатывать на гектаре 50 т почвы, обеспечив ее гумусом.

Результаты расчетов количества не съеденных червей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Количество отловленных кротов и переработанная дождевыми червями земля

Table 2

The number of moles caught and the land processed by earthworms

Год	Заготовлено шкурков в год	Количество не потребленной отловленными кротами пищи, т	Количество несъеденных червей, млн шт.	Переработанная земля не съеденными червями, млн т
1928	738 000	22896	45792	45,792
1969	488 000	15140	30280	30,280
1975	245 000	7601	15202	15,202
1980	Промысел прекращен			

С учетом данных [18], если 0,5 млн червей перерабатывает за сезон 50 т почвы, то в 1928 году 457920 (22896000000/0,5) млн червей переработали 45792000 т (45,792 млн т почвы).

Таким образом, количество выловленных кротов напрямую влияет на качественное состояние почвы, которая обогащается гумусом, за счет оставшихся в почве червей. Из таблицы следует, что снижение отлова приводит к снижению массы переработанной земли, а это снижает массу генерируемого червями гумуса.

Правомерен вопрос: какими современными техническими средствами (химизацией) можно заменить выполненную за год плодотворную работу по структурированию и гумусированию почвы дождевыми червями? Сравниться с дождевыми червями в этой их благотворной деятельности никто и ничто не может. Повышение количества кротов напрямую ведет к снижению количества дождевых червей и, соответственно,

плодородия почвы. Дождевой червь – главный потребитель мертвых растительных остатков. Поглощая вместе с почвой огромное количество растительного детрита (распадающихся мертвых растительных тканей), микробов, грибов, водорослей, простейших, нематод и т. д., они переваривают их, выделяя с копролитами большое количество собственной кишечной микрофлоры, ферментов, витаминов, биологически активных веществ, которые обладают антибиотическими свойствами и препятствуют развитию патогенной (болезненной) микрофлоры, гнилостных процессов, выделению зловонных газов, обеззараживают почву и придают ей приятный запах земли. В противовес этому выделения кротов тоже обогащают почву, но одновременно повышают в ней количество различных патогенных организмов.

Известно [15], что кроты заражены кровососущими эктопаразитами, причем степень зараженности значительно выше, чем у грызунов. При этом отдельные виды блох, паразитирующих на кротах, имеют широкий круг хозяев, паразитирующих и на других животных, что может явиться причиной заражения при контакте с кротами домашних животных, в том числе таких, как собаки. Всего на кротах обнаружено 28 видов эктопаразитов, из них 4 вида иксодид, 16 видов гамазид, 3 вида тромбикулид, 2 вида аноплор и 3 вида сифонаптер [19]

Повышенная численность блох на кроте, которые являются в том числе и переносчиками таких опасных для человека заболеваний, как туляремия, лептоспироз, трихинеллез и др., позволяет отнести крота к группе животных, важных в санитарно-эпидемиологическом отношении [20].

Поэтому появление кротов на дачных и садовых участках создает проблемы их владельцам и не только из-за испорченного облика участка и губительного действия на растения, но и в последующем обеднения почвы, за счет снижения деятельности дождевого червя и возможности заражения домашних животных различными, в том числе опасными заболеваниями.

Возродить утерянный кротовый промысел в настоящее время вряд ли удастся, найти предпринимателя-энтузиаста, который поставит и вернет его в масштабах прошлого века нет, но борьбу с кротами на участках, где возможен близкий контакт с ним человека или домашних животных, необходимо осуществлять. Поэтому следует найти другое решение, которое направлено на удаление кротов с территории садов, огородов, рекреационных зон без физического уничтожения. Несмотря на многочисленные методы удаления кротов, предложенные сегодня специалистами, эффективными не один из них назвать нельзя и в первую очередь потому, что эти средства содержат различные яды, которые даже при объявлении их экологической безопасности вносить в землю нежелательно. Известно, что кроты обладают обостренным обонянием [21] и, кроме того, вынуждены дышать ранее выдохнутым воздухом, поэтому внесение даже незначительного количества отпугивающего средства с низкой летучестью и слабой адсорбируемостью почвой позволяет длительное время оказывать воздействие на крота.

Изгнание кротов с участка можно проводить отпугивателем, состав которого был разработан специалистами ООО «Белспецкомплект» и представляет смесь, включающую в качестве основного компонента (не менее 75 %) мелкодисперсный порошок дигидрата сульфата кальция и высокомолекулярные углеводороды различной природы, при полном отсутствии соединений фосфора, хлора, фтора и мышьяка. Данный отпугиватель при его применении обеспечивает смещение кротов с площади обитания на 15–20 м. Испытания данного состава проводились на 27 частных садовых участках в Минской обл., которые показали, что уход кротов с освоенной ими территории составлял весь вегетационный сезон.

Ущерб, наносимый популяцией кротов, достаточно велик. Можно оценить его в денежном выражении по количеству и площади проплешин, образованных кротами в посевах, по количеству вывернутых саженцев в лесу и в питомниках. Однако методик оценки снижения рекреационных и эстетических возможностей садово-парковых и других мест отдыха в настоящее время не имеется, нет и достаточных данных для установления численной зависимости между количеством кротов и заболеваемостью домашних животных на данной территории.

Заключение

Прекращение с 1980-х гг. пушного промысла крота, а также мягкие зимы и другие факторы улучшения условий для размножения, питания и расселения вида, привели к значительному росту его численности, особенно на приусадебных участках. Роющая деятельность крота влияет на эстетические и рекреационные возможности предназначенных для этого ландшафтов и территорий. Установлено, что наличие кротов уменьшает используемую посевную площадь на 0,8 %. Рост популяции кротов приводит к снижению количества генерируемого червями гумуса, плодородного почвенного слоя на десятки млн т. Обилие кротов ухудшает санитарно-эпидемиологическую обстановку для домашних животных, которые могут иметь контакт с ними в зонах отдыха или на приусадебных участках. Борьба с кротами на приусадебных участках может помочь отпугиватель, разработанный фирмой «Белспецкомплект».

Библиографические ссылки

1. Яковлев АА, Бабич НВ. Кроты и защита от них. *Защита и карантин растений*. 2015;2:34–37.
2. Кротовый промысел поддерживает последний из могикан. *Деловой Петербург*. 2001;4.09.

3. Сарафанов А. Кротовый промысел. *Уральский следопыт*. 1939;5:64–66.
4. Бертон Р. *Чувства животных*. Москва: Мир; 1972. 220 с.
5. Бурко ЛД, Гричук ВВ. *Позвоночные животные Беларуси*. Минск: БГУ; 2004. 391 с.
6. Странные эксперименты сэра Чарльза. *Наука и жизнь*. 2018;12:46–61.
7. Catania KC. Stereo and serial sniffing guide navigation to an odor source in a mammal. *Nature Communications*. 2013;4:1441.
8. Маринин ЛИ, Шипшкова НА, Мокриевич АН, Дятлов ИА. Роль дождевых червей в распространении сибирской язвы. *Бактериология*. 2020;5(4):30-34. DOI: 10.20953/2500-1027-2020-4-30-34.
9. Skoczen S. On food storage of the Mole, *Talpa europaea* Linnaeus 1758. *Acta Theriologica*. Bialowieza. 1961;2:23–43.
10. Jimenez R, Burgos M, Barrionuevo FJ. The Biology and Evolution of Fierce Females (Moles and Hyenas). *Annual Review of Animal Biosciences*. 2022;11:97–114.
11. *Животный мир Беларуси. Позвоночные. Крот европейский — Talpa europaea Linnaeus*. Минск: Издательский центр БГУ; 2013. с. 315–316.
12. Сержанин ИН. *Млекопитающие Белоруссии*. Минск: Академии наук Белорусской ССР; 1961. 321 с.
13. Domenico Prisa. Earthworm humus for the growth of vegetable plants. *Sustainable Food Systems*. 2019;5:968–969.
14. Фалькенштейн БЮ. Положение и перспективы промысла крота в Ленинградской области. В: *Промысловая фауна и охотничье хозяйство Северо-Запада РСФСР*. Москва, Ленинград: Тип. им. Лоханкова; 1934. 96 с.
15. Галанцев ВИ, Русаков ОС. Некоторые черты строения кровеносной системы крота в связи с экологическими особенностями вида. *Сборник научно-технической информации «Охота, пушнина и дичь»*. Киров: Экономика; 1967. Выпуск 20. с. 27–30.
16. Пилипко ЕН, Харченко НН, Вернодубенко ВС. Почвообразующее значение выносящей (переползочной) деятельности крота европейского (*talpa europaea*, L) в таежном биогеоценозе. *Биосфера*. 2020;4:223–230.
17. *Жыўёлы свет Беларусі*. Минск: Беларуская Савецкая Энцыклапедыя; 1978. с. 220.
18. Войтехов МЯ. О некоторых факторах, лимитирующих почвообразовательную роль дождевых червей в европейской части таежной зоны России. *Почвы и окружающая среда*. 2018;4:267–274.
19. Никитченко НТ. Насекомоядные (Insectivora) и их эктопаразиты на территории Центральной Лесостепи Украины. В: *Фундамент. и прикладные проблемы науки : Материалы VI Международного симпозиума*. – Москва: РАН; 2011. Том 3. с. 48–59.
20. Никитченко НТ. Эктопаразиты крота обыкновенного (*Talpa europaea* L.) в условиях Центральной Лесостепи Украины. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій*. Біологія. 2011. Выпуск 8. с. 168–173.
21. Catania KC. All in the Family – Touch Versus Olfaction in Moles. *American Association for Anatom*. 2019;1:65–76.

References

1. Yakovlev AA, Babich NV. *Kroty i zashchita ot nikh. Zashchita i karantin rasteniy* [Protection and quarantine of plants]. 2015;2:34–37. Russian.
2. Mole fishing supports the last of the Mohicans. *Delovoy Peterburg* [Business Petersburg]. 2001;4:09. Russian.
3. Sarafanov A. Mole fishing. *Ural'skiy sledopyt* [Ural tracker]. 1939;5:64-66. Russian.
4. Berton R. *Chuvstva zhivotnykh* [Feelings of animals]. Moscow: Mir; 1972. 220 p. Russian.
5. Burko LD, Grichuk VV. *Pozvonochnyye zhivotnyye Belarusi* [Vertebrates of Belarus]. Minsk: BGU; 2004. 391 p. Russian.
6. Strannyye eksperimenty sera Charl'za. *Nauka i zhizn'* [Science and life]. 2018;12:46–61. Russian.
7. Catania KC. Stereo and serial sniffing guide navigation to an odor source in a mammal. *Nature Communications*. 2013;4:1441.
8. Marinin LI, Shishkova NA, Mokriyevich AN, Dyatlov IA. *Rol' dozhddevykh chervev v rasprostraneni sibirskoy yazyv. Bakteriologiya* [Bacteriology.] 2020;5(4):30-34. DOI: 10.20953/2500-1027-2020-4-30-34. Russian.
9. Skoczen S. On food storage of the Mole, *Talpa europaea* Linnaeus 1758. *Acta Theriologica*. Bialowieza. 1961;2:23–43.
10. Jimenez R, Burgos M, Barrionuevo FJ. The Biology and Evolution of Fierce Females (Moles and Hyenas). *Annual Review of Animal Biosciences*. 2022;11:97–114.
11. *Zhivotnyy mir Belarusi. Pozvonochnyye. Krot yevropeyskiy* [Fauna of Belarus. Vertebrates. European mole – *Talpa europaea* Linnaeus]. Минск: BSU Publishing Center; 2013. p. 315–316. Russian.
12. Serzhanin IN. *Mlekovitayushchiye Belarusi* [Mammals of Belarus]. Minsk: Academy of Sciences of the Byelorussian SSR; 1961. 321 p. Russian.
13. Domenico Prisa. Earthworm humus for the growth of vegetable plants. *Sustainable Food Systems*. 2019;5:968–969.
14. Falkenstein BYu. Status and prospects of mole fishing in the Leningrad region. In: *Promyslovaya fauna i okhotnich'ye khozyaystvo Severo-Zapada RSFSR* [Commercial fauna and hunting economy of the North-West of the RSFSR, Sat. Promohotbiostantsii]. Moscow, Leningrad: Type named Lohankov; 1934. 96 p. Russian.
15. Galantsev VP., Rusakov OS. Some features of the structure of the circulatory system of the mole in connection with the ecological characteristics of the species. *Sbornik nauchno-tekhnicheskoy informatsii «Okhota, pushnina i dичь»* [Collection of scientific and technical information «Hunting, furs and game»]. Kirov: Economics, 1967. Volume 20. p. 27–30. Russian.
16. Pilipko EN, Kharchenko NN, Vernodubenko VS. Soil-forming significance of the enduring (redepositing) activity of the European mole (*talpa europaea*, L) in the taiga biogeocenosis. *Biosfera* [Biosphere]. 2020;4:223–230. Russian.
17. *Zhyvol'ny svet Belarusi* [Life is the light of Belarus]. Минск: Belaruskaya Savetskaya Entsyklapedyya; 1978. 220 p. Belarusian.
18. Voitekhov MJ. On some factors limiting the soil-forming role of earthworms in the European part of the taiga zone of Russia. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda* [Soils and the environment]. 2018;4:267–274. Russian.
19. Nikitchenko NT. *Nasekomoyadnyye (Insectivora) i ikh ektoparazity na territorii Tsentralnoy Lesostepi Ukrainy. Fundament. i prikladnyye problemy nauki* [Foundation. and applied problems of science]. Materialy VI Mezhdunarodnjgi simpoziuma. – Moscow: RAN; 2011. Part 3. p. 48–59. Russian.
20. Nikitchenko NT. *Ektoparazity krota obyknovennogo (Talpa europaea L.) v usloviyakh Tsentral'noy Lesostepi Ukrainy. Priroda Zakhidnogo Polissya ta prileglikh teritoriy* [Nature of the Western Polissia and adjacent territories]. *Biologiya*. 2011. Volume 8. p. 168–173
21. Catania KC. All in the Family – Touch Versus Olfaction in Moles. *American Association for Anatom*. 2019;1:65–76.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ БИОРАЗНООБРАЗИЯ АССАМБЛЕЙ ЖУЖЕЛИЦ (COLEOPTERA, CARABIDAE) ВЕРХОВОГО БОЛОТА ПРИ АНТРОПОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ИХ МЕСТООБИТАНИЙ

Ю. И. НОВИКОВА¹⁾, Г. Г. СУШКО¹⁾

¹⁾Витебский государственный университет им. П. М. Машерова,
Московский пр., 33, 210023, г. Витебск, Беларусь

Представленные результаты исследований демонстрируют особенности изменчивости биоразнообразия ассамблей жуков-жужелиц на верховом болоте при различной степени трансформации местообитаний в условиях Белорусского Поозерья. Материал собран с помощью почвенных ловушек на верховом болоте, часть которого осушена сетью мелиоративных каналов. Исследования проводились на малонарушенном участке (контроль) с характерной болотной растительностью и трех участках различной степени трансформации: участок с частично нарушенным сфагновым покровом и нарушенным режимом влажности, фрезерные поля с удаленным сфагновым покровом (открытый торф), осушенные участки с удаленным сфагновым покровом, покрытые древесной и кустарниковой растительностью. Выявлена дифференциация α - и β -разнообразия на участках различной степени антропогенной трансформации. Среднее число видов ($\chi^2 = 10,72, p = 0,01$) и особей ($F = 57,54, p = 0,001$) в выборках значительно различалось. При нарушении, а также при полном удалении сфагнового покрова число видов снижается по сравнению с контрольными биотопами. Однако при формировании древесного и кустарничкового покрова, наоборот, возрастает. Среднее число особей снижается, за исключением участков с частично нарушенным сфагновым покровом. С увеличением антропогенной трансформации, видовое разнообразие и выравненность возрастают по сравнению с контролем ($H' = 1,54 \pm 0,05, J' = 0,42 \pm 0,03$) и достигают максимума на участках с древесной растительностью ($H' = 2,48 \pm 0,38, J' = 0,97 \pm 0,11$). Значения индексов разнообразия Шеннона ($\chi^2 = 14,57, p = 0,002$) и выравненности Пилелу ($F = 18,44, p = 0,001$) значительно различались во всех исследованных биотопах. Анализ β -разнообразия продемонстрировал значимые различия видового состава ассамблей жужелиц участков различной степени трансформации (ANOSIM; $R = 0,90, p = 0,0001$). Видовой состав и структура доминирования ассамблей жужелиц претерпевают наибольшие изменения при полном удалении сфагнового покрова. При этом состав группы доминантов значительно расширяется. Специализированные виды верховых болот *Agonum ericeti* (Panzer, 1809), *Pterostichus diligens* (Sturm, 1824) и *P. rhaeticus* Heer, 1838 сменяются такими обитателями открытых пространств и эвритопными видами, как *Cicindela sylvatica* Linnaeus, 1758, *Poecilus cupreus* (Linnaeus, 1758), *P. versicolor* (Sturm, 1824), *Agonum sexpunctatum* (Linnaeus, 1758), *Harpalus latus* (Linnaeus, 1758).

Ключевые слова: верховое болото; α - и β -разнообразие; жужелицы; антропогенное воздействие.

BIODIVERSITY VARIABILITY OF THE GROUND BEETLE ASSEMBLAGES (COLEOPTERA, CARABIDAE) OF A PEAT BOG DURING ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF THEIR HABITATS

Yu. I. NOVIKOVA^a, G. G. SUSHKO^a

^aVitebsk State University named after P. M. Masharov,
33 Moscow Avenue, Vitebsk 210015, Belarus

Corresponding author: G. Sushko (gennadis@rambler.ru)

Образец цитирования:

Новикова ЮИ, Сушко ГГ. Изменчивость биоразнообразия ассамблей жужелиц (Coleoptera, Carabidae) верхового болота при антропогенной трансформации их местообитаний. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2023;1:12–19.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-12-19>

For citation:

Novikova YuI, Sushko GG. Biodiversity variability of the ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) of a peat bog during anthropogenic transformation of their habitats. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2023;1:12–19. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-12-19>

Авторы:

Юлия Игоревна Новикова – аспирант кафедры экологии и географии.

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

Authors:

Yulia I. Novikova, postgraduate student at the department of ecology and geography.

julia.novikova9@mail.ru

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

The presented research demonstrated the features of the variability of the biodiversity of the carabid assemblages in the peat bog with the different degrees of transformation in the Belarusian Lake District. The material was collected using pitfall traps in a peat bog, part of which was drained by a network of reclamation canals. The studies were carried out on an intact site (control) with specialized peat bog vegetation and on three sites of different degrees of transformation: a site with a partially disturbed sphagnum cover, peat fields with a removed sphagnum cover (open peat), and drained sites with a removed sphagnum mat covered with trees and shrubs. Differentiation of α - and β -diversity in areas of different degrees of anthropogenic transformation was revealed. The average number of species ($\chi^2 = 10.72$, $p = 0.01$) and individuals ($F = 57.54$, $p = 0.001$) in the samples differed significantly. If the sphagnum cover was disturbed or completely removed, the number of species decreases as compared to the control biotopes. Whereas during the formation of tree and bush cover, on the contrary, species richness increases. The average number of individuals decreases, except for sites with partially disturbed sphagnum cover. With an increase in anthropogenic transformation, species diversity and evenness was higher compared to the control ($H' = 1.54 \pm 0.05$, $J' = 0.42 \pm 0.03$) and reach a maximum in sites with woody vegetation ($H' = 2.48 \pm 0.38$, $J' = 0.97 \pm 0.11$). The values of the Shannon diversity index ($\chi^2 = 14.57$, $p = 0.002$) and the Pielou evenness index ($F = 18.44$, $p = 0.001$) differed significantly in all studied habitats. The analysis of β -diversity demonstrated significant differences in the species composition of ground beetle assemblages in sites with different degrees of transformation (ANOSIM; $R = 0.90$, $p = 0.0001$). The species composition and dominance structure of ground beetle assemblages undergo the greatest changes when the sphagnum cover is completely removed. At the same time, the composition of the group of dominants is significantly expanding. Specialized raised bog species *Agonum ericeti* (Panzer, 1809), *Pterostichus diligens* (Sturm, 1824) and *P. rhaeticus* Heer, 1838 were replaced by open space dwellers and eurytopic species such as *Cicindela sylvatica* Linnaeus, 1758, *Poecilus cupreus* (Linnaeus, 1758), *P. versicolor* (Sturm, 1824), *Agonum sexpunctatum* (Linnaeus, 1758), *Harpalus latus* (Linnaeus, 1758).

Keywords: peat bog; α - and β -diversity; ground beetles; anthropogenic impact.

Введение

Водно-болотные угодья являются жизненно важными экосистемами для сохранения биоразнообразия бореальной флоры и фауны в умеренной зоне Европы вследствие изменения климата. Около трети из них составляют торфяные болота, характеризующиеся накоплением органического вещества в залежах торфа и кислой, стоячей водой с низким содержанием минеральных веществ. Они обеспечивают несколько таких важных функций, как накопление больших запасов воды и регуляцию гидрологического режима обширных территорий, связывание углерода и снижение эмиссии парниковых газов [1]. Кроме того, они обеспечивают подходящие места обитания для многих специализированных и находящихся под угрозой исчезновения видов растений и животных, так называемых тирфобионтов и тирфофилов. Площадь верховых болот сокращается во всем мире, но самые серьезные потери произошли в Европе, где они в настоящее время считаются одними из наиболее уязвимых и находящихся под угрозой исчезновения местообитаний [2]. Основными угрозами для сохранения биоразнообразия этих местообитаний являются осушение и добыча торфа. К середине прошлого века в ходе осушения многие болота утратили свои биосферные функции и превратились в природно-антропогенные системы. Ряд болот, на которых были осушены отдельные участки, подверглись частичной трансформации. На таких верховых болотах сохранились места обитания специализированных видов. В Витебской области 52,7 % общей площади верховых болот находится в мало нарушенном состоянии, 40,1 % болот имеют ненарушенные участки разных размеров, 3,2 % осушено полностью и 4,0 % площадей выработано и не используется [3].

При исследовании антропогенной трансформации верховых болот наибольшее внимание уделялось изменениям растительности, а также физико-химических показателей торфа и воды [3]. Однако не менее важно сформировать представление о динамике биоразнообразия консументов, которые также реагируют на изменение экологических условий болотных экосистем в ходе антропогенной трансформации. В их числе значительная доля приходится на беспозвоночных животных и, в частности, на жесткокрылых семейства журулиц. Представители данного семейства считаются общепризнанными биоиндикаторами и широко используются для оценки экологического состояния различных местообитаний.

Цель исследования: изучить изменчивость биоразнообразия ассамблей журулиц верхового болота при разной степени трансформации.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в Витебском районе Витебской обл. на верховом болоте «Глоданский мох» (координаты 54°29'N 30°79'E). Площадь болота составляет 2180 га. Южная часть болота (около 600 га) осушена сетью мелиоративных каналов и выработана фрезерным способом. Примерно такой же по площади участок торфодобыче не подвергался и содержит участки со сфагновым покровом и характерной болотной растительностью (сосново-кустарничково-сфагновые и кустарничково-пушицево-сфагновые

фитоценозы), а также участки с частично нарушенным сфагновым покровом и болотной травяно-кустарничковой растительностью (прилегают к фрезерным полям) (рис. 1).

Исследования проводились в следующих биотопах: 1) естественное болото (ЕБ) принято за контроль. Характеризуется высокой влажностью. Сфагновый покров сплошной. В травяном ярусе преобладает пушица влагалищная (*Eriophorum vaginatum* L.), в кустарничковом – багульник болотный (*Ledum palustre* L.), мирт болотный (*Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench) и вереск обыкновенный (*Calluna vulgaris* (L.) Hill.) Также отмечены подбел многолистный (*Andromeda polifolia* L.), клюква болотная (*Oxycoccus palustris* Pers.) и водяника черная (*Empetrum nigrum* L.); 2) болото с нарушенным режимом влажности (НБ) расположено между торфоразработками и естественными участками. Прилегающие мелиоративные каналы обеспечивают дренаж, что способствует снижению влажности. Сфагновый покров нарушен. Присутствуют отдельные фрагменты открытого торфа. В травяном ярусе преобладает *E. vaginatum*, в кустарничковом – *C. vulgaris* и *L. palustre*. Также отмечены голубика топяная (*Vaccinium uliginosum* L.) и водяника черная; 3) фрезерные поля (ФП) представляют собой осушенные открытые участки со снятым сфагновым покровом (добыча торфа производилась фрезерным способом). Травяно-кустарничковая растительность отсутствует. Расположены между мелиоративными каналами. Ширина около 20 м. Отдельные участки торфа покрыты мхом политрихом сжатым (*Polytrichum strictum* Bridel, J. Bot. (Schrader)); 4) мелколиственный лес (ДК) расположен на осушенных участках со снятым сфагновым покровом, покрытые древесной и кустарничковой растительностью, которые находятся рядом с мелиоративными каналами и по краям фрезерных полей. Древостой представлен в основном березой пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и осинкой обыкновенной (*Populus tremula* L.), кустарники – различными видами рода ива (*Salix* spp.). В кустарничковом ярусе присутствуют вереск обыкновенный (*C. vulgaris*), черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.) и брусника обыкновенная (*V. vitis-idaea* L.) (рис. 1).

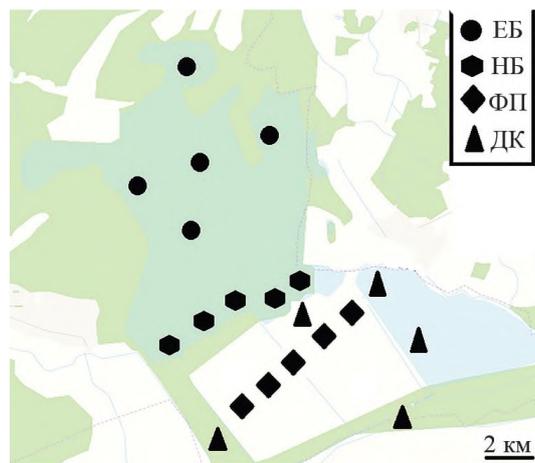


Рис. 1. Размещение стационаров в исследованных биотопах верхового болота «Глоданский мох»: ЕБ – естественное болото, НБ – болото с нарушенным режимом влажности, ФП – фрезерные поля, ДК – мелколиственный лес

Fig. 1. Localization of the study sites on the peat bog «Glodansky mokh». NB – natural bog, DB – bog with disturbed moisture regime, MF – milling fields, SLF – small-leaved forest

Сборы жуужелиц проводились с 29 апреля до 28 октября в 2020 г. (интервал 10–14 дней) с использованием почвенных ловушек (с фиксатором – 9 % раствором уксусной кислоты). В каждом биотопе было установлено по 15 ловушек (по 3 ловушки на 5 участках, выбранных в случайном порядке). Каждая группа из 3 ловушек была принята за выборочную совокупность. Выбранные участки располагались на расстоянии не менее 50 м от друг от друга. Расстояние между ловушками составляло 5 м.

Структура доминирования в ассамблеях охарактеризована по шкале О. Ренконнена [4], согласно которой виды, на которые приходится более 5 % от общего числа особей, считаются доминантными; 2–5 % – субдоминантными; 1–2 % – рецедентными; менее 1 % – субрецедентными.

Перед выполнением статистического анализа данные были проверены на соответствие закону нормального распределения с использованием теста Шапиро – Уилка. Если данные соответствовали закону нормального распределения, для оценки различий между выборками использовался однофакторный дисперсионный анализ (one-way ANOVA) и апостериорные сравнения с применением теста Тьюки, в противном случае использовали непараметрический тест Краскела – Уолиса и тест Дана для апостериорных сравнений. Для оценки альфа-разнообразия применены индексы Шеннона (H') и Пилелу (J'). Дополнительно были рассчитаны значения непараметрического эстиматора видового богатства Chao 2, позволяющего проводить сравнительную оценку выявленного (Sobs) и прогнозируемого возможного (Sest) числа видов.

Бета-разнообразие ассамблей жукелиц исследовано с помощью непараметрического теста ANOSIM (analysis of similarity), позволяющего выявить сходства или различия видового состава. Визуализация различий выполнена с применением метода ординации – неметрического многомерного шкалирования (non-metric multidimensional scaling, NMDS) на основе меры расстояния Брея – Кертиса [5]. Для выявления видов, которые вносят наибольший вклад в гетерогенность ассамблей жукелиц различных биотопов, использован тест IndVal (Indicator Value). Анализы выполнены с использованием программы PAST 4.11 [6].

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследований выявлено 28 видов семейства жукелиц (табл. 2). Максимальное число видов (14) зарегистрировано в ассамблеях жукелиц на участках с древесной и кустарниковой растительностью, тогда как наименьшее – на болоте с нарушенным режимом влажности (8 видов). На малонарушенном болоте выявлено 12 видов (табл. 1). Среднее число видов в выборках значительно различалось ($\chi^2 = 10,72, p = 0,01$) (рис. 2). Непараметрический эстиматор видового богатства Чhao-2 показал, что выявленное среднее число видов (S_{obs}) в выборках составляет от 84,61 до 100 % от прогнозируемого (S_{est}) (табл. 1). Это свидетельствует о высоких выборочных усилиях, приложенных во время сбора материала.

Таблица 1

Показатели α -разнообразия ассамблей жукелиц (Coleoptera, Carabidae) различных биотопов верхового болота «Глоданский мох»

Table 1

Measures of α -diversity of the ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) in different habitats on the peat bog «Glodansky mokh»

Показатель α -разнообразия	Биотопы			
	естественное болото	болото с нарушенным режимом влажности	фрезерные поля	мелколиственный лес
Выявленное число видов	12	8	11	14
Ожидаемое число видов Чhao-2 (S_{est})	13	8	13	16
Соотношение S_{obs} и S_{est} (%)	92,30	100	84,61	87,50
Среднее число видов $S_{mean} \pm SE$	7,00 \pm 0,31	5,20 \pm 0,37	6,00 \pm 1,04	8,80 \pm 0,58
Среднее число особей $N \pm SE$	33,40 \pm 1,72	45,40 \pm 3,81	7,60 \pm 1,36	13,20 \pm 1,46
Индекс разнообразия Шеннона $H' \pm SE$	1,54 \pm 0,05	0,66 \pm 0,07	2,19 \pm 0,51	2,48 \pm 0,38
Индекс выравненности Пielу $J' \pm SE$	0,42 \pm 0,03	0,16 \pm 0,01	0,88 \pm 0,17	0,97 \pm 0,11

Примечание. Чhao-2 – эстиматор видового богатства (S_{est} – предсказанное эстиматором число видов); $S_{mean} \pm SE$ – среднее число видов \pm стандартная ошибка; $N \pm SE$ – среднее число особей \pm стандартная ошибка; $H' \pm SE$ – индекс разнообразия Шеннона \pm стандартная ошибка; $J' \pm SE$ – индекс выравненности Пielу \pm стандартная ошибка.

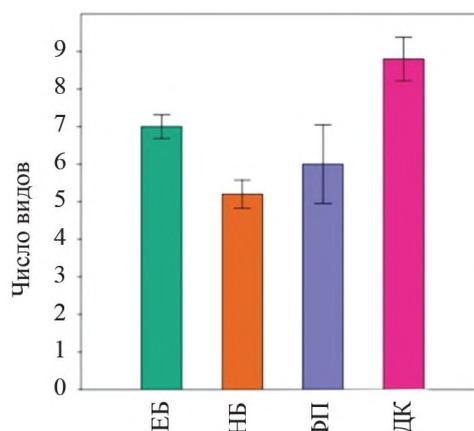


Рис. 2. Средние значения числа видов (\pm стандартная ошибка) ассамблей жукелиц (Coleoptera, Carabidae) различных биотопов верхового болота «Глоданский мох»: ЕБ – естественное болото, НБ – болото с нарушенным режимом влажности, ФП – фрезерные поля, ДК – мелколиственный лес

Fig. 2. Average values of the number of species (\pm standard error) of the ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) in different habitats on the peat bog «Glodansky mokh»: NB – natural bog, DB – bog with disturbed moisture regime, MF – milling fields, SLF – small-leaved forest

Среднее число особей в выборках в ассамблеях жуужелиц, соответствующих четырем исследованным биотопам, достоверно различалось ($F = 57,54, p = 0,001$). Наибольшее среднее число особей ($45,40 \pm 3,81$) было зарегистрировано на болоте с нарушенным режимом влажности, наименьшее – на фрезерных полях ($7,60 \pm 1,36$). На малонарушенном болоте данный показатель составил $33,40 \pm 1,72$ (табл. 1, рис. 3).

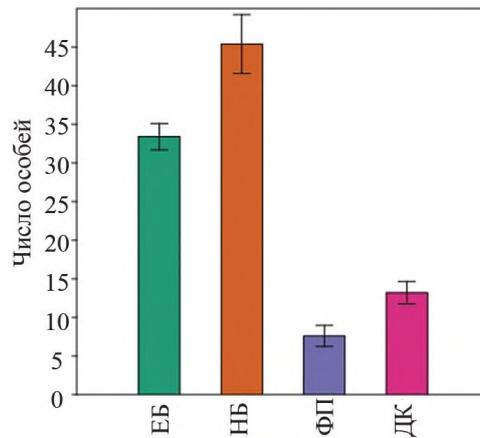


Рис. 3. Средние значения числа особей (± стандартная ошибка) ассамблей жуужелиц (Coleoptera, Carabidae) различных биотопов верхового болота «Глоданский мох»: ЕБ – естественное болото, НБ – болото с нарушенным режимом влажности, ФП – фрезерные поля, ДК – мелколиственный лес

Fig. 3. Average values of the number of individuals (± standard error) of the ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) in different habitats on the peat bog «Glodansky mokh»: NB – natural bog, DB – bog with disturbed moisture regime, MF – milling fields, SLF – small-leaved forest

Анализ видового разнообразия, основанный на значениях индекса Шеннона, продемонстрировал наиболее высокое разнообразие в ассамблеях жуужелиц участков болот с развитым древостоем ($H' = 2,48 \pm 0,38$), наименьшее ($H' = 0,66 \pm 0,07$) – на болоте с нарушенным режимом влажности. На малонарушенном болоте данный показатель составил $1,54 \pm 0,05$ (табл. 2). Значения индекса Шеннона значимо различались ($\chi^2 = 14,57, p = 0,002$). Выравненность видов по обилию, выраженная индексом Пилу, проявила сходный тренд с видовым разнообразием и значимо различалась во всех исследованных биотопах ($F = 18,44, p = 0,001$) (табл. 2).

Таблица 2

Видовой состав и относительное обилие (%) жуужелиц (Coleoptera, Carabidae) ассамблей жуужелиц (Coleoptera, Carabidae) различных биотопов верхового болота «Глоданский мох»

Table 2

Species composition and relative abundance (%) of the ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) in different habitats on the peat bog «Glodansky mokh»

Вид	Биотопы			
	естественное болото	болото с нарушенным режимом влажности	фрезерные поля	мелколиственный лес
<i>Cicindela sylvatica</i> Linnaeus, 1758	0	0	7,89	0
<i>Loricera pilicornis</i> (Fabricius, 1775)	0	0	0	4,55
<i>Carabus cancellatus</i> Illiger, 1798	5,95	1,09	7,89	3,02
<i>C. clathratus</i> Linnaeus, 1761	1,00	0	0	0
<i>C. granulatus</i> Linnaeus, 1758	1,00	0	5,27	6,06
<i>Cychrus caraboides</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	0	9,09
<i>Leistus ferrugineus</i> (Linnaeus, 1758)	0	1,09	0	0
<i>Poecilus cupreus</i> (Linnaeus, 1758)	1,49	0	31,58	0
<i>P. versicolor</i> (Sturm, 1824)	0	1,46	0	19,70
<i>Pterostichus diligens</i> (Sturm, 1824)	15,92	4,76	0	0
<i>P. niger</i> (Schaller, 1783)	1,49	0	5,27	4,55
<i>P. oblongopunctatus</i> (Fabricius, 1787)	0	0	0	4,55
<i>P. rhaeticus</i> Heer, 1838	15,92	0	0	4,55

Вид	Биотопы			
	естественное болото	болото с нарушенным режимом влажности	фрезерные поля	мелколиственный лес
<i>Calathus erratus</i> (Sahlberg, 1827)	0	0	0	15,15
<i>Amara brunnea</i> (Gyllenhal, 1810)	1,49	1,09	7,89	0
<i>A. eurynota</i> (Panzer, 1797)	0	0	5,27	0
<i>A. communis</i> (Panzer, 1797)	0	0	0	4,55
<i>Bembidion biguttatum</i> (Fabricius, 1779)	1,00	0	0	0
<i>Anisodactylus binotatus</i> (Fabricius, 1787)	0	0	0	4,55
<i>Agonum ericeti</i> (Panzer, 1809)	52,74	87,96	0	0
<i>A. sexpunctatum</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	5,27	0
<i>A. fuliginosus</i> (Panzer, 1809)	0	0	7,89	0
<i>Limodromus assimilis</i> (Paykull, 1790)	1,00	0	0	0
<i>Harpalus latus</i> (Linnaeus, 1758)	1,00	0	7,89	0
<i>H. rufipes</i> (Degeer, 1774)	0	0	0	13,64
<i>Cymindis vaporariorum</i> (Linnaeus, 1758)	0	1,46	0	3,02
Число отловленных экземпляров	167	227	38	66

В ходе анализа структуры доминирования установлено, что на естественном болоте участках доминировали *Agonum ericeti* (52,74 % от всех отловленных особей), *Pterostichus diligens* и *P. rhaeticus* (по 15,92 %), *Carabus cancellatus* (5,95 %). На участках болота с нарушенным режимом влажности доминировал только один вид *Agonum ericeti* (87,96%). На фрезерных полях состав группы доминантов значительно расширяется и включает такие виды, как *Poecilus cupreus* (31,58 %), *Cicindela sylvatica*, *Carabus cancellatus*, *Pterostichus vernalis*, *Amara brunnea*, *Agonum fuliginosus* и *Harpalus latus* (по 7,89 %), а также *Carabus granulatus*, *Pterostichus niger*, *Amara eurynota* и *Agonum sexpunctatum* (по 5,27 %). На участках с древостоем преобладали *Poecilus versicolor* (87,96 %), *Calathus erratus* (15,15 %), *Harpalus rufipes* (13,64 %), *Cychrus caraboides* (9,09 %) и *C. granulatus* (6,06 %).

Анализ β -разнообразия показал отчетливые и значимые различия видового состава жуужелиц четырех исследуемых биотопов на основании теста ANOSIM ($R = 0,90$, $p = 0,0001$). По результатам ординационного анализа (NMDS), наибольшими различиями видового состава характеризуются ассамблеи жуужелиц естественного болота, фрезерных полей и мелколиственного леса. Ассамблеи жуужелиц болота с нарушенным режимом влажности в наибольшей степени были сходны с ассамблеями фрезерных полей (рис. 4).

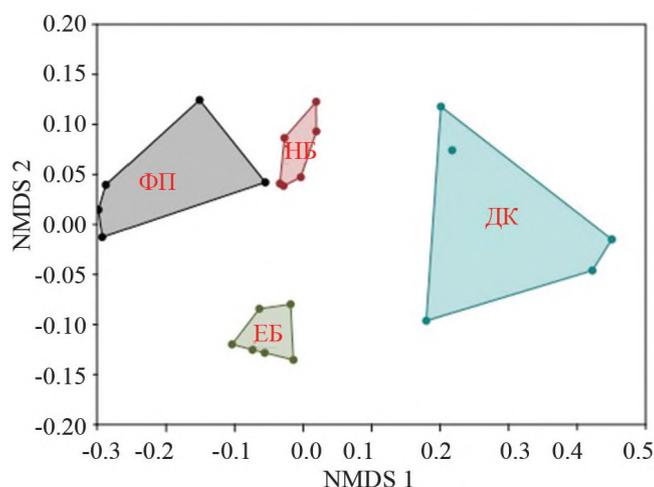


Рис. 4. Диаграмма ординации (NMDS) видового состава ассамблей жуужелиц (Coleoptera, Carabidae) различных биотопов верхового болота «Глоданский мох»: EB – естественное болото, NB – болото с нарушенным режимом влажности, FP – фрезерные поля, ДЛ – мелколиственный лес

Fig. 4. Ordination diagram (NMDS) of species composition of the ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) in different habitats on the peat bog «Glodansky mokh»: NB – natural bog, DB – bog with disturbed moisture regime, MF – milling fields, SLF – small-leaved forest

Результаты теста IndVal позволяют выявить виды, которые вносят наибольший вклад в гетерогенность ассамблей жукелиц обследованных биотопов (рис. 5). В каждом из них отмечено от 3 до 8 видов. Однако значимые показатели теста ($p < 0,05$) установлены только для отдельных из них, что демонстрирует наибольшую приуроченность данных видов к определенному биотопу. На контрольных участках в числе таких видов *Pterostichus rhaeticus* (IndVal = 89,89, $p = 0,01$), *P. diligens* (IndVal = 71,11, $p = 0,01$), *Carabus cancellatus* (IndVal = 57,14, $p = 0,04$), на нарушенных участках болот – *Agonum ericeti* (IndVal = 69,45, $p = 0,01$), на участках с древесным – *Poecilus versicolor* (IndVal = 79,59, $p = 0,01$).

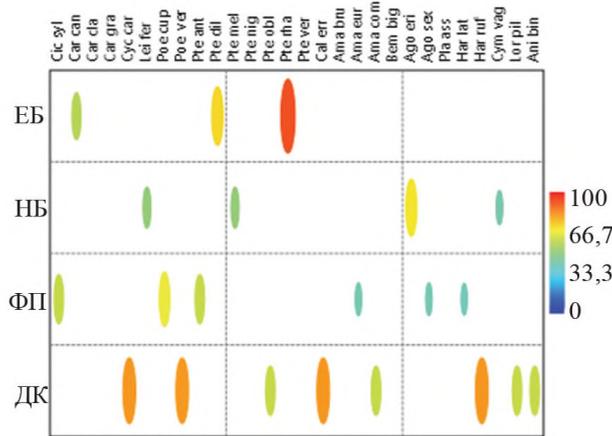


Рис. 5. Результаты теста IndVal ассамблей жукелиц (Coleoptera, Carabidae) различных биотопов верхового болота «Глоданский мох» (0–100 – значение показателя IndVal): EB – естественное болото, NB – болото с нарушенным режимом влажности, ФП – фрезерные поля, ДК – мелколиственный лес

Fig. 5. IndVal test results of the ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) in different habitats on the peat bog «Glodansky mokh» (0–100 – the value of the IndVal): NB – natural bog, DB – bog with disturbed moisture regime, MF – milling fields, SLF – small-leaved forest

Представленные результаты исследований демонстрируют особенности изменчивости биоразнообразия ассамблей жуков-жукелиц на верховом болоте при различной степени трансформации местообитаний в условиях Белорусского Поозерья. Как известно, на верховых болотах, на которых не велась хозяйственная деятельность, в моховом покрове обитает небольшое число, преимущественно специализированных видов жесткокрылых, отличающихся высокой численностью [2]. Сходная тенденция наблюдается на участке исследованного болота, на котором торфоразработки не проводились. Здесь преобладали виды, характерные для верховых болот, такие как *Pterostichus diligens*, *P. rhaeticus* и *Agonum ericeti*. Однако последний характеризовался наиболее высокими показателями численности на болоте с нарушенным режимом влажности, что, вероятно, связано с процессами гомеостаза в популяции данного вида вследствие ухудшения условий обитания. Такой тренд отмечен ранее и для других тирфофильных и тирфобионтных видов на болотах с нарушенным гидрологическим режимом [7].

В ходе сравнительного анализа α -разнообразия выявлено, что видовое богатство при нарушении режима влажности, а также при полном удалении сфагнового покрова снижается, по сравнению с контрольными биотопами. В первом случае это, вероятно, обусловлено тем, что на примыкающих к торфоразработкам участках, вследствие нарушения гидрологического режима, разрушается сфагновый покров. Это приводит к потере экологических ниш многих гигрофильных болотных видов. В частности, на фрезерных полях появляются не характерные для болот обитатели открытых биотопов *Cicindela sylvatica*, *Poecilus cupreus*, *Agonum sexpunctatum*, *Harpalus latus* и др. Однако зарастание осушенных участков болот деревьями и кустарниками способствует возрастанию числа видов. Среднее число особей при антропогенной трансформации, наоборот, снижалось. Исключение составляли ассамблеи жукелиц биотопов, расположенных между контрольными участками и фрезерными полями, с нарушенным сфагновым покровом. В первую очередь, это характеризуется возрастанием числа особей стенобионта верховых болот *Agonum ericeti*, что, по всей видимости, связано с процессами гомеостаза в популяции данного вида, вызванными в ответ на относительно не высокое изменение экологических условий местообитания (болотная растительность, включая сфагновый покров, присутствует, хотя и частично нарушена в результате снижения влажности). В данных биотопах также отмечено снижение видового разнообразия и выравненности видов по обилию, по сравнению с контрольными биотопами. В остальных биотопах, характеризующихся большей степенью трансформации, видовое разнообразие и выравненность, наоборот, возрастают, достигая максимума на участках с древесной растительностью. Это обусловлено расширением группы доминантных видов,

в отличие от ассамблей жужелиц биотопов со сфагновым покровом, которые, как показал ряд исследований, характеризуются преобладанием ограниченного числа видов с высокой численностью, адаптированных к экологическим условиям, создаваемым сфагновыми мхами (высокая влажность, кислотность, низкая минерализация) [3].

В наибольшей степени дифференциация ассамблей жужелиц проявилась в различии видового состава. Различными методами статистического (ANOSIM, NMDS) анализа продемонстрированы значимые ($p < 0,05$) отличия ассамблей жужелиц как контрольных участков от трансформированных, так и трансформированных между собой. Выявлены виды, которые вносят наибольший вклад в дифференциацию ассамблей. В биотопах со сфагновым покровом в их числе специализированные обитатели *Pterostichus rhaeticus*, *P. diligens* и *Agonum ericeti*. Индикаторная роль стенобионтного вида *Agonum ericeti* в биотопах с нарушенным сфагновым покровом проявилась в резком возрастании численности. Сходная тенденция была отмечена ранее на постпирогенных участках верховых болот [7]. На фрезерных полях ни один из выявленных видов не проявил значимой приуроченности к данным биотопам, тогда как на участках с древесной растительностью таким видом был *Poecilus versicolor*. Данный вид известен как эвритопный обитатель открытых пространств. Его высокую приуроченность к этим биотопам, по всей видимости, можно объяснить разреженностью и фрагментарностью древостоя в совокупности с небольшой высотой.

Заключение

Таким образом, ассамблеи жужелиц продемонстрировали дифференциацию α - и β -разнообразия на участках верхового болота различной степени антропогенной трансформации. Видовое богатство при нарушении, а также при полном удалении сфагнового покрова снижается, по сравнению с контрольными биотопами, тогда как при формировании древесного и кустарничкового покрова возрастает. Среднее число особей снижается, за исключением участков с частично нарушенным сфагновым покровом. С увеличением антропогенной трансформации индекса Шеннона возрастает за счет выравненности и увеличения числа видов, достигая максимума на участках с древесной растительностью. Видовой состав и структура доминирования ассамблей жужелиц претерпевают наибольшие изменения при полном исчезновении сфагнового покрова.

Библиографические ссылки

1. Rydin H, Jeglum JK. The biology of peatlands. Oxford: Oxford University Press; 2006. 382 p.
2. Spitzer K, Danks HV. Insect biodiversity of boreal peat bogs. *Annual Review of Entomology*. 2006;51:137–161. DOI: 10.1146/annurev.ento.51.110104.151036
3. Кухарчик ТИ. *Верховые болота Беларуси*. Минск: Навука і тэхніка; 1993. 136 с.
4. Renkonen O. Statistisch–Ökologische Untersuchungen über die terrestrische Käferwelt der finnischen Bruchmoore. *Annales Zoologicae – Botanicae Societate Fennicae – Vanamo*. 1938;6(1):231.
5. McCune B, Grace JB. Analysis of ecological communities. Glendeden Beach: MjM Software Design; 2002. 300 p.
6. Hammer Ø, Harper DAT, Ryan RD. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):1–9.
7. Сушко ГГ. *Фауна и экология жесткокрылых (Ectognatha, Coleoptera) верховых болот Белорусского Поозерья*. Витебск: ВГУ им. П. М. Машерова; 2006. 247 с.

References

1. Rydin H, Jeglum JK. The biology of peatlands. Oxford: Oxford University Press; 2006. 382 p.
2. Spitzer K, Danks HV. Insect biodiversity of boreal peat bogs. *Annual Review of Entomology*. 2006;51:137–161. DOI: 10.1146/annurev.ento.51.110104.151036
3. Kukharchik TI. *Verkhovyye bolota Belarusi* [Raised bogs of Belarus]. Minsk: Navuka i tekhnika; 1993. 136 p. Russian.
4. Renkonen O. Statistisch–Ökologische Untersuchungen über die terrestrische Käferwelt der finnischen Bruchmoore. *Annales Zoologicae – Botanicae Societate Fennicae – Vanamo*. 1938;6(1):231.
5. McCune B, Grace JB. Analysis of ecological communities. Glendeden Beach: MjM Software Design; 2002. 300 p.
6. Hammer Ø, Harper DAT, Ryan RD. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):1–9.
7. Sushko GG. *Fauna i ekologiya zhestkokrylykh (Ectognatha, Coleoptera) verkhovykh bolot Belorusskogo Poozer'ya* [Fauna and ecology of beetles (Ectognatha, Coleoptera) of raised bogs of the Belarusian Lakeland]. Vitebsk: VGU im. P. M. Masherova; 2006. 247 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 16.01.2023.
Received by editorial board 16.01.2023.

УДК 581.524.1:581.142+581.524.2

ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЭКСТРАКТОВ ИЗ ЛИСТЬЕВ *ACER NEGUNDO* И *ROBINIA PSEUDOACACIA* НА ПРОРОСТКАХ ТЕСТ-КУЛЬТУР

М. Н. ЯХНОВЕЦ^{1,2)}, Е. О. ЮРЧЕНКО³⁾

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

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

³⁾Белостокский политехнический университет, ул. Сельская, 45А, 15-351, г. Белосток, Польша

Клен ясенелистный и робиния лжеакация выступают как наиболее проблемные древесные инвазионные виды во флоре Беларуси. При механическом уничтожении данных растений рассматривается возможность использования их фитомассы в качестве мульчи в садоводстве и огородничестве. Для такого применения необходимо оценить негативные аллелопатические эффекты фитомассы на другие растения. В исследовании методом биотестирования оценивается действие комплекса неидентифицированных биологически активных веществ из *Acer negundo* и *Robinia pseudoacacia*. При этом учитывается процент проросших семян, длина корешка и гипокотили у тест-объектов *Lepidium sativum*, *Raphanus sativus* и *Daucus carota* при инкубировании семян *in vitro* на фоне водных экстрактов из порошка зеленых листьев клена и робинии, при концентрациях экстракта в пересчете на сухую массу суспендированного порошка 5, 10, 50 и 100 г/л, с контролем на дистиллированной воде. Использована фитомасса в двух вариантах: высушенная на солнце и выдержанная под дождем с высушиванием на солнце до помещения под дождь. Результаты свидетельствуют, что клен ясенелистный обладает большей ингибирующей аллелопатической активностью (фитотоксичностью), чем робиния лжеакация. В частности, при концентрации 100 г/л вытяжка из листьев клена полностью подавляла прорастание семян кресс-салата, редиса и моркови, а вытяжка из листьев робинии оказывала нейтральный эффект (несущественно снижала всхожесть семян) в отношении редиса и моркови. Как правило, эффект ингибирования развития проростков по трем изученным параметрам увеличивается с повышением концентрации вытяжки. Исключение составляет удлинение корешков проростков моркови, которое слегка стимулировалось вытяжкой из клена 10 г/л и робинии 50 г/л. Заготовленная фитомасса *A. negundo* и *R. pseudoacacia* под воздействием дождя частично теряет свои ингибирующие аллелопатические свойства. Например, фитомасса *A. negundo* проявляет после такой экспозиции (при концентрации экстракта 10 г/л) в 2,3 раза меньший эффект замедления роста корешков у кресс-салата. В отдельных случаях вытяжки (фитомасса, выдержанная под дождем) имеют стимулирующий эффект на развитие проростков: экстракт из клена 5 г/л повышал всхожесть семян моркови на 25 %; экстракт из робинии 5 г/л вызывал удлинение корешка у проростков моркови в 1,9 раза; экстракты из робинии 5–50 г/л вызывали удлинение гипокотили у кресс-салата в 1,3–1,4 раза. Тест-объекты показали разную чувствительность к одинаковым экстрактам. В частности, экстракт из робинии 100 г/л снижал всхожесть семян кресс-салата до 3,8 %, а моркови – до 89,3 %. Экстракт из листьев робинии, выдержанных под дождем, уменьшал среднюю длину корешка у кресс-салата – в 4,5 раза, а у редиса – в 1,5 раза.

Ключевые слова: аллелопатия; биотестирование; инвазионные виды; овощные культуры; водный экстракт; древесные сорняки.

Благодарность. Авторы выражают признательность работникам Болотной станции Полесская за предоставленные данные метеонаблюдений.

Образец цитирования:

Яхновец МН, Юрченко ЕО. Оценка биологической активности экстрактов из листьев *Acer negundo* и *Robinia pseudoacacia* на проростках тест-культур. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2023;1:20–31.

<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-20-31>

For citation:

Yakhnovets MN, Yurchenko EO. Evaluation of the biological activity of the extracts from *Acer negundo* and *Robinia pseudoacacia* leaves on germinating seeds of test cultures. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2023;1:20–31. Russian.

<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-20-31>

Авторы:

Максим Николаевич Яхновец – аспирант кафедры общей биологии и генетики¹⁾; преподаватель-стажер кафедры ландшафтного проектирования²⁾.

Евгений Олегович Юрченко – доцент кафедры лесопользования и лесоразведения.

Authors:

Maksim N. Yakhnovets, postgraduate student at the department of general biology and genetics^{a)}; trainee teacher at the department of landscape design^{b)}.

maksim.yakhnovets@gmail.com

Eugene O. Yurchenko, associate professor at the department of silviculture and forest utilization.

yauheni.yurchanka@pb.edu.pl

EVALUATION OF THE BIOLOGICAL ACTIVITY OF THE EXTRACTS FROM *ACER NEGUNDO* AND *ROBINIA PSEUDOACACIA* LEAVES ON GERMINATING SEEDS OF TEST CULTURES

M. N. YAKHNOVETS^{a,b}, E. O. YURCHENKO^c

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

^bPolesky State University,

23 Dniaproïskay flatsilii Street, Pinsk 225710, Belarus

^cBiałystok University of Technology, 45A Wiejska Street,
Białystok 15-351, Poland

Corresponding author: M. Yakhnovets (maksim.yakhnovets@gmail.com)

Ash-leaved maple and black locust belong to the most actively spreading woody invasive species in flora of Belarus. In process of control of these plants by mechanical destruction, a potential use of their phytomass as mulch in gardening is considered. For such usage, the negative allelopathic effect of the phytomass on other plants should be assessed. In the paper the effects of the complex of unidentified biologically active substances from *Acer negundo* and *Robinia pseudoacacia* are studied. This is achieved by a method of biotesting: seeds of *Lepidium sativum*, *Raphanus sativus*, and *Daucus carota* were incubated *in vitro* with water extracts from green leaves of *Acer negundo* and *Robinia pseudoacacia*, grounded into powder before extraction. The percent of germinated seeds, length of main root, and length of hypocotylus were recorded. The experimental concentrations of phytomass for extracts were 5, 10, 50, and 100 g/l; distilled water was in control. Two variants of phytomass were tested: green leaves, dried on sun, and green leaves, exposed to rain, but dried on sun before such exposing. The results show that *A. negundo* has higher allelopathic (phytotoxic) activity, than *R. pseudoacacia*. In particular, extract from maple (100 g/l) completely suppressed seed germination of all three test plants, whereas extract from black locust (100 g/l) had statistically neutral effect (slightly decreased the percent of germinated seeds) on radish and carrot. As a rule, the inhibitory effect on all three studied parameters of germlings become higher along with increase of extract concentration. Exceptions were the growth of main root in carrot, which was slightly stimulated by extracts from maple (10 g/l) and black locust (50 g/l). The leaf mass of both species after exposing to rain partly lost its inhibitory allelopathic activity. The phytomass of *A. negundo* after such exposition demonstrated 2.3 times less inhibition effect on growth of roots in watercress (extract 10 g/l). In some cases the phytomass, exposed to rain, had stimulating action on germlings: extract from maple (5 g/l) increased the percentage of germinated seeds in carrot on 25 %; extract from black locust (5 g/l) provoked 1.9 times elongation of root in carrot in comparison with control; extracts from black locust (5–50 g/l) stimulated 1.3–1.4 times elongation of hypocotylus in watercress. Test plants showed different sensitivity to the same extracts. In particular, black locust extract (100 g/l) decreased the number of germinated seeds for watercress to 3.8 %, but only to 89.3 % for carrot. Black locust extract (leaves, exposed to rain, 100 g/l) decreased the average root length in watercress in 4.5 times, but in radish – in 1.5 times.

Keywords: allelopathy; biotesting; invasive species; vegetable cultures; water extract; wooden weeds.

Acknowledgments. The authors expresses his gratitude to the staff of the Poleskaya Wetland Station for providing meteorological observation data.

Введение

Инвазия, или массовое распространение отдельных чужеродных видов растений в экосистемах – это одна из глобальных экологических проблем современности, которая характерна также и для территории Беларуси. Большой интерес для изучения представляет инвазия древесных видов, которая обусловлена их биологическими особенностями и жизненными стратегиями. В Республике Беларусь из инвазионных видов древесной флоры в наибольшей степени проявляют себя клен ясенелистный (*Acer negundo* L.) и робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.), которые признаны законодательно видами, запрещенными к интродукции и (или) акклиматизации (в соответствии с Постановлением Минприроды РБ № 35 от 28.10.2016 г. и Постановлением Совета Министров РБ № 1002 от 07.12.2016 г.). По сравнению с инвазионными видами травянистых жизненных форм, древесные виды характеризуются значительной силой воздействия на окружающие растения через фитогенное поле и высокими темпами накопления фитомассы за один вегетационный сезон.

Клен ясенелистный, американский – это листопадное дерево семейства Sapindaceae, происходит из Северной Америки. Вид появился в Беларуси в XIX в., стал активно использоваться в культуре. Во второй половине XX в. начал активно дичать и проявлять признаки инвазии. На данный момент *A. negundo* часто встречается по всей территории Беларуси. В Государственном кадастре растительного мира учтено 4271 место его произрастания на общей площади 351 га [1–4]. Вид относится к быстрорастущим деревьям, активно распространяется спонтанно через самосев. В Беларуси *A. negundo* в особенности натурализовался

в полустественные лесные и опушечные сообщества. Растение обладает сильными аллелопатическими свойствами. Физиологически активные вещества, содержащиеся в опавшей листве, действуют как ингибиторы роста конкурирующих растений [1; 2]. Американский клен не обладает высокими показателями хозяйственного значения [5], в частности, дает малоценную древесину, которая редко используется.

Робиния лжеакация – это крупное листопадное дерево семейства Fabaceae, происходящее из Северной Америки. Вид появился на территории Беларуси в конце XVIII в. в качестве декоративной и медоносной культуры. Но спустя время он начал проявлять ярко выраженные признаки экспансии. На сегодняшний день вид относится к числу наиболее распространенных древесных интродуцентов в Беларуси, отмечен в 105 административных районах страны, где выявлено 1681 его местонахождение на общей площади 495 га [1–4]. Успешная экспансия *R. pseudoacacia* объясняется биологическими особенностями вида, дающими повышенную конкурентоспособность: растение обладает хорошо развитой корневой системой с аппаратом азотфиксации, продуцирует большое количество семян с высокой жизнеспособностью (семена могут сохранять всхожесть до 50 лет), характеризуется быстрым ростом, интенсивным вегетативным возобновлением, повышенной экологической пластичностью [1; 2]. Но в отличие от многих инвазионных растений, *R. pseudoacacia* имеет довольно высокий потенциал для хозяйственного применения [5; 6]. Отмечается возможность использования вида в качестве декоративного, пищевого, кормового, медоносного, технического, лекарственного и фитомелиоративного растения [1].

Известно, что при значительном распространении инвазионного вида его полное уничтожение невозможно, возможен только контроль (сдерживание) расширения существующих и появления новых популяций. В ходе вырубki этих растений возникает проблема утилизации надземных частей. При этом существует путь использования измельченной фитомассы в качестве мульчи и компоста в садоводстве и огородничестве, что позволит извлечь выгоду из проблемы древесных фитоинвазий. Однако для данных видов не изучена полностью ценность и безопасность их биомассы (мульчи) в отношении культурных растений.

Цель исследования – установление влияния водных вытяжек из зеленой заготовленной листовой фитомассы *A. negundo* и *R. pseudoacacia*, побывавшей под воздействием солнца и дождя, на развитие других растений на модели проростков тест-культур *in vitro*, оценка фитотоксичности в контексте возможного использования данной фитомассы для мульчирования почвы под культурными растениями.

Ранее изучалось действие экстрактов из фитомассы *Acer negundo* [7–10] и *Robinia pseudoacacia* [8; 9; 11] на развитие проростков тест-культур, однако не сравнивались экстракты из растительной массы, подготовленной различными способами, в том числе выдержанной под дождем.

Материалы и методы исследования

Для оценки аллелопатической активности был выбран метод биотестирования вытяжек из растений *in vitro* [12–14] с модификациями. В качестве тест-объектов были выбраны кресс-салат обыкновенный (*Lepidium sativum* L.), редис (*Raphanus sativus* L.) сорта «Дуо», морковь посевная (*Daucus carota* L.). Первые два вида классически используются как тест-объекты [12; 15] и относятся к семейству Brassicaceae. Морковь была выбрана как культура, близкая к кресс-салату и редису по условиям выращивания согласно ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести», но при этом относящаяся к другому семейству – Apiaceae.

Заготовку листовой фитомассы *A. negundo* и *R. pseudoacacia* производили с живых растений в синантропных сообществах сельского поселения в условиях Белорусского Полесья (д. Теревень Пинского р-на Брестской обл.) летом – в начале осени 2021 г. Фитомассу подготавливали следующим образом: способ 1 – после сбора сушили на солнце; способ 2 – после сбора сушили на солнце, затем выдерживали в течение 4 суток под воздействием дождя (за этот период выпало около 22,5 мм осадков), после чего сушили в помещении при комнатной температуре. До экстрагирования готовая фитомасса хранилась также в помещении при комнатной температуре.

Лабораторные эксперименты проводились на базе отраслевой лаборатории ДНК и клеточных технологий в растениеводстве и животноводстве Полесского государственного университета в январе – марте 2022 г. Для приготовления вытяжки фитомассу измельчали до порошкообразного состояния в кофемолке. Порошок суспендировали в дистиллированной воде в четырех вариантах концентрации: 5, 10, 50 и 100 г/л и выдерживали в течение суток в термостате при +25 °С. Под «концентрацией вытяжки» далее условно понимается сухая масса порошка, помещаемого в воду перед экстракцией. Вытяжки фильтровали через марлю.

В чашки Петри с внутренним диаметром 90 мм помещался диск фильтровальной бумаги, на котором равномерно размещались семена тест-культур – по 10 шт. каждой культуры в одну чашку, в трехкратной повторности как для вариантов опыта, так и для контролей. Диски увлажнялись 5 мл экстракта из порошка *A. negundo* и *R. pseudoacacia*, а в контрольные чашки добавляли по 5 мл дистиллированной воды. Чашки инкубировали в термостате при температуре +25 °С. Таким образом, каждый вариант опыта с контролем включал 90 семян. Общее количество семян с учетом всех концентраций, тест-объектов, видов и типов фитомассы – 2160 шт.

Тестирование по определению всхожести семян проводилось согласно ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». При этом учитывался процент проросших семян, длина главного корня и гипокотиля у тест-объектов. Подсчет количества проростков и их измерения для кресс-салата производили через 5 суток после начала инкубации, редиса – через 6, моркови – через 10. Количество проросших семян тест-объектов выражали в процентах к соответствующему количеству проростков в контроле, которое принимали за 100 %. Для статистической обработки результатов применялся t-критерий Стьюдента при сравнении средних величин [16]. Критические значения t-критерия Стьюдента определяли для уровня значимости $p < 0,05$. Для каждого среднего арифметического значения для выборок была определена относительная погрешность (5 %), которая была рассчитана в *Microsoft Excel* с помощью функции Предел погрешностей и показана в виде отрезков на столбчатых диаграммах ниже.

Результаты исследования и их обсуждение

Влияние экстрактов на прорастание семян. Нами было отмечено, что в большинстве случаев всхожесть семян тест-культур в контроле не составляла 100 %. По этой причине в качестве поправки количество проросших семян в вариантах опыта выражали в процентах к контролю. С учетом достоверности различий между средними (различия принимаются как статистически значимые при $p < 0,05$) и типом влияния на развитие проростков на диаграммах ниже используются следующие условные обозначения: в случае ингибирования значения выделены красным цветом, в случае стимулирования – зеленым цветом, при несущественном ингибирующем или стимулирующем действии (нейтральный эффект) – черным цветом.

Экстракты из фитомассы *A. negundo*, подготовленной способом 1, то есть не находившейся под дождем, обладают сильной аллелопатической активностью при высоких концентрациях (рис. 1). При концентрациях 5 и 10 г/л влияние экстрактов нейтрально, за исключением кресс-салата, где при концентрации 5 г/л наблюдается легкий ингибирующий эффект (75 % проросших семян относительно контроля). При концентрации 50 г/л эффект ингибирования становится более ярко выраженным, в особенности в отношении моркови (полное подавление прорастания). У кресс-салата при данной концентрации проросло 7,7 % семян, у редиса – 46,7 %. При концентрации 100 г/л наблюдается полное ингибирование прорастания семян.

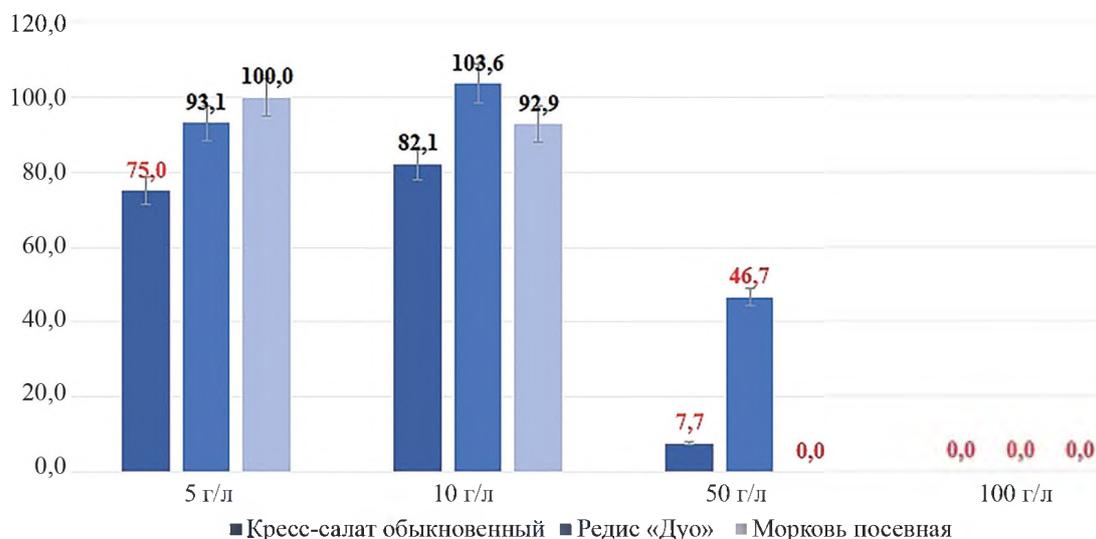


Рис. 1. Процент проросших семян тест-объектов под воздействием различных концентраций экстракта из фитомассы *A. negundo*, не находившейся под дождем

Fig. 1. The percentage of germinated seeds of test objects under the influence of various concentrations of the extract from *A. negundo* phytomass that was not exposed to rain

Экстракты из фитомассы клена, приготовленной способом 2, то есть выдержанной под воздействием атмосферных осадков, подобно предыдущим обладают сильной аллелопатической активностью при концентрациях 50 и 100 г/л (рис. 2). При концентрации 5 г/л экстракт нейтрален для кресс-салата, немного ингибирует прорастание редиса (80 %) и оказывает стимулирующий эффект на морковь (125 %). Действие экстракта 10 г/л было нейтральным для всех тест-культур. При концентрации 50 г/л не проросли кресс-салат и морковь, а семена редиса проросли на 50 % от контроля. При 100 г/л наблюдается полное ингибирование прорастания кресс-салата и моркови, незначительно прорастают семена редиса.

Экстракты из фитомассы *R. pseudoacacia*, подготовленной способом 1, в целом мало влияют на прорастание семян (рис. 3). Почти во всех вариантах наблюдался нейтральный эффект, но все же в некоторых

случаях экстракты ингибировали прорастание. Незначительное ингибирование наблюдалось при концентрации 10 г/л у кресс-салата (71,4 % проросших семян относительно контроля) и при 50 г/л у редиса (86,7 %). При концентрации 100 г/л у кресс-салата наблюдалось ярко выраженное ингибирование (3,8 % от контроля).

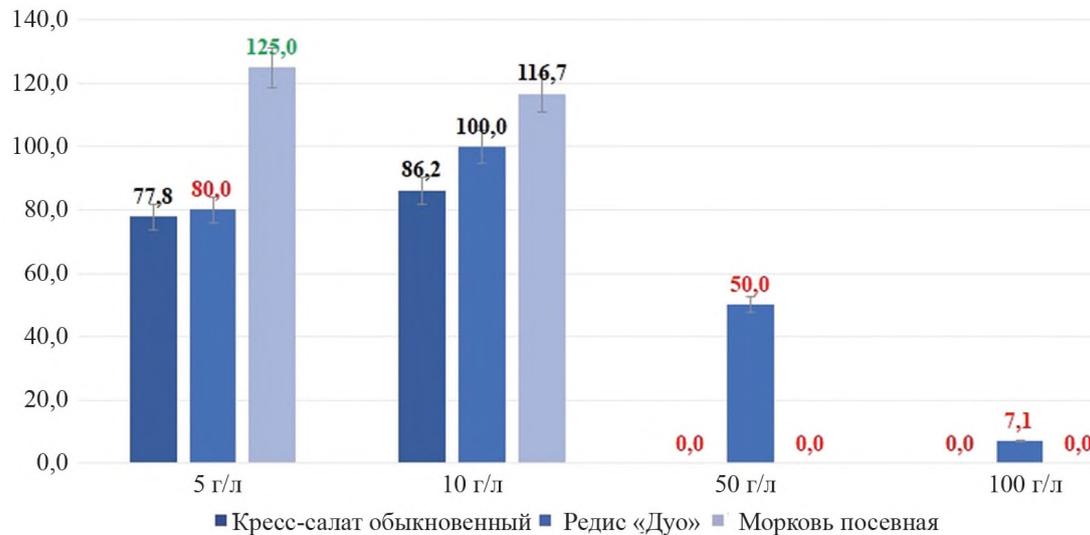


Рис. 2. Процент проросших семян тест-объектов под воздействием различных концентраций экстракта из фитомассы *A. negundo*, выдержанной под дождем

Fig. 2. The percentage of germinated seeds of test objects under the influence of various concentrations of the extract from *A. negundo* phytomass weathered by rain

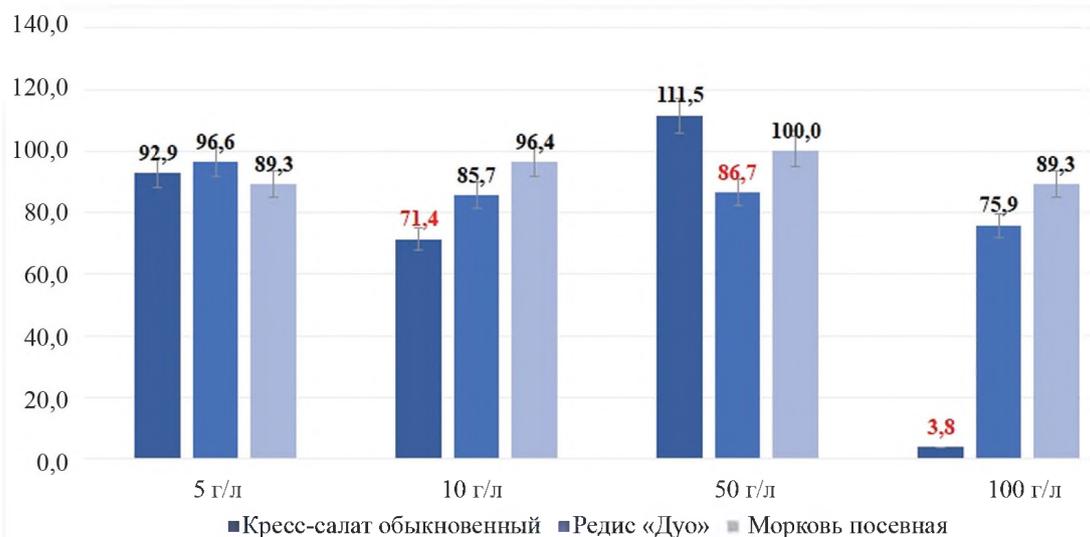


Рис. 3. Процент проросших семян тест-объектов под воздействием различных концентраций экстракта из фитомассы *R. pseudoacacia*, не находившейся под дождем

Fig. 3. The percentage of germinated seeds of test objects under the influence of various concentrations of the extract from *R. pseudoacacia* phytomass that was not exposed to rain

Экстракты из фитомассы робинии, приготовленной способом 2, на прорастание семян также влияют незначительно (рис. 4). Практически во всех вариантах наблюдался нейтральный эффект, но в некоторых случаях было замечено ингибирование прорастание семян. Незначительное ингибирование наблюдалось при концентрации 50 г/л у редиса (75 % проросших семян относительно контроля) и при 100 г/л у кресс-салата (70,4 %).

В качестве рабочей гипотезы мы допустили, что под воздействием дождя листовая фитомасса теряет часть своих аллелопатически активных веществ. Это подтверждается результатами экспериментов. В частности, при использовании фитомассы клена, приготовленной способом 2, проявился стимулирующий эффект у моркови при концентрации 5 г/л; также при концентрации 100 г/л наблюдалось незначительное

проращение семян редиса при использовании фитомассы, приготовленной способом 2, в то время как экстракты, полученные из фитомассы, подготовленной способом 1, полностью ингибировали их проращение (рис. 1, 2). Для экстрактов из робинии отмечено следующее: при использовании фитомассы, приготовленной способом 1, процент проращения семян кресс-салата при концентрации 100 г/л составил 3,8; а при использовании фитомассы, приготовленной способом 2, он возрос до 70,4 (рис. 3, 4).

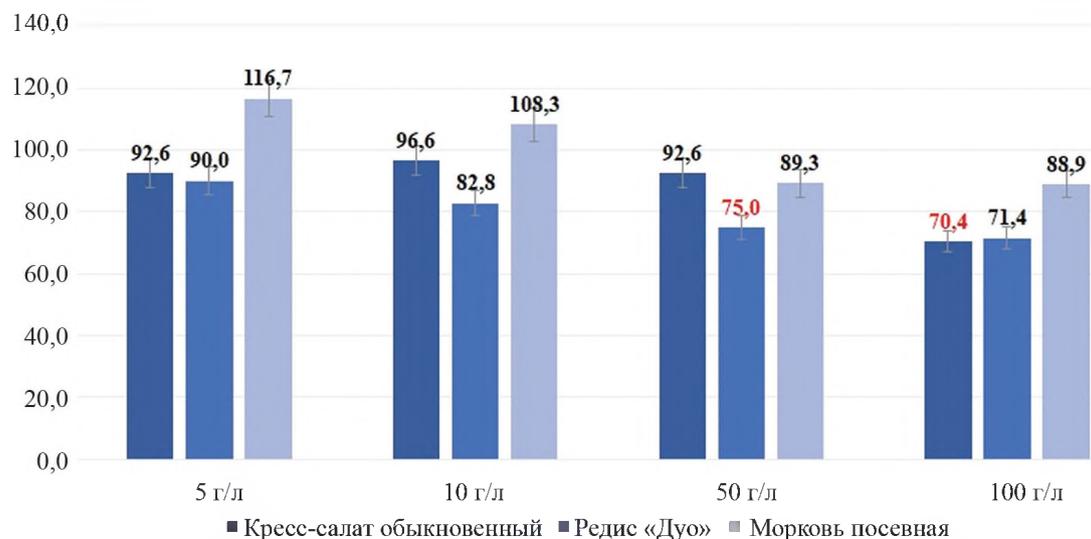


Рис. 4. Процент проросших семян тест-объектов под воздействием различных концентраций экстракта из фитомассы *R. pseudoacacia*, выдержанной под дождем

Fig. 4. The percentage of germinated seeds of test objects under the influence of various concentrations of the extract from *R. pseudoacacia* phytomass weathered by rain

Влияние экстрактов на длину корней проростков. Экстракты из фитомассы *A. negundo*, подготовленной способом 1, обладают ярко выраженным аллелопатическим воздействием на тест-объекты (рис. 5).

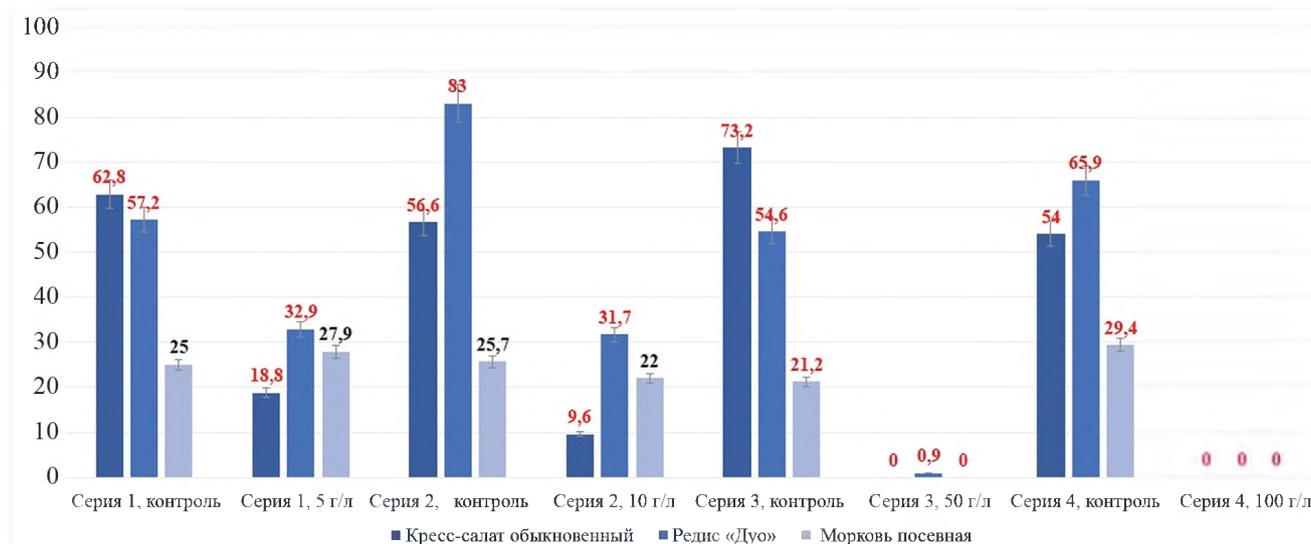


Рис. 5. Длина корней тест-объектов (мм), выросших на экстракте из фитомассы *A. negundo*, не находившейся под дождем

Fig. 5. The length of the germling roots of test objects (mm) grown on extracts from *A. negundo* phytomass that was not exposed to rain

При концентрациях 5 и 10 г/л нейтральный эффект выявлен только у моркови, тогда как на кресс-салат и редис экстракты оказывают ингибирующее воздействие. Очень короткие корешки формируются у редиса при концентрации 50 г/л, в то время как кресс-салат и морковь не дают проростков. Как было отмечено выше, вытяжка из листьев клена, подготовленных способом 1, при концентрации 100 г/л полностью подавляет проращение семян всех трех тест-культур, развития корешка и гипокотыля не наблюдается.

В отношении развития корешка проростка результаты влияния экстрактов из фитомассы клена, подготовленной способом 2, незначительно отличаются от результатов, полученных на экстрактах из фитомассы,

выделенных способом 1. Тем не менее, сравнение картин влияния данных экстрактов (рис. 5, 6) показывает снижение аллелопатического потенциала фитомассы, которая была выдержана под дождем: в частности, у моркови при концентрации 5 г/л наблюдается нейтральный эффект, а при 10 г/л – стимулирование роста корней.

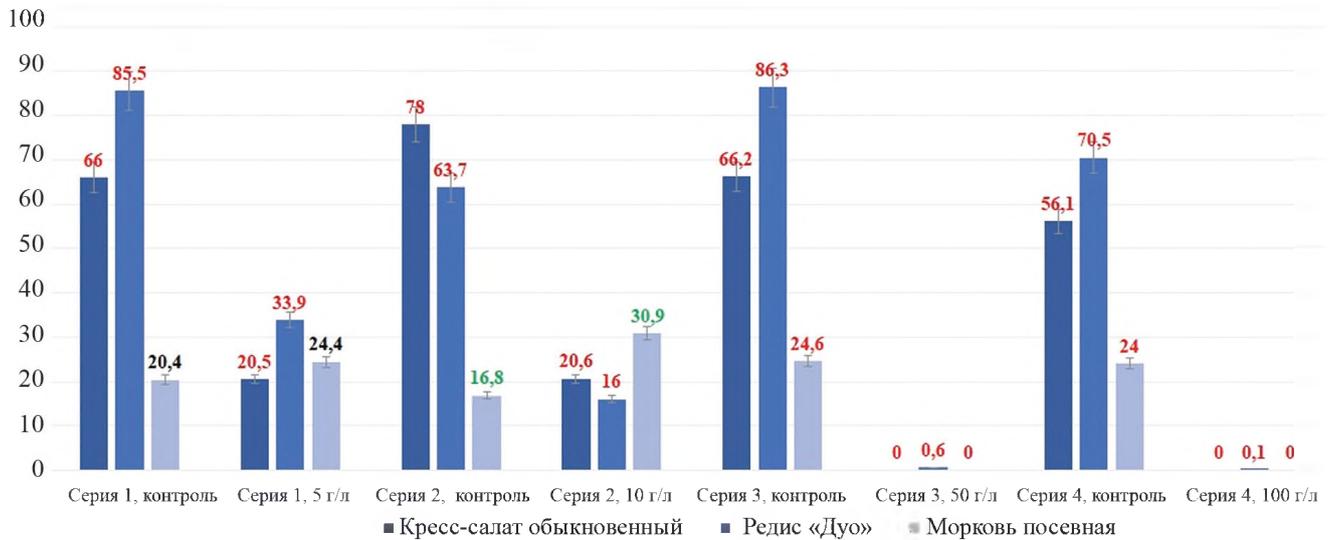


Рис. 6. Длина корней тест-объектов (мм), выросших на экстракте из фитомассы *A. negundo*, выдержанной под дождем

Fig. 6. The length of the germling roots of test objects (mm) grown on extracts from *A. negundo* phytomass weathered by rain

Экстракты из фитомассы *R. pseudoacacia*, подготовленной способом 1, оказывают влияние на длину корней проростков тест-культур следующим образом: наиболее чувствительным к аллелопатическому влиянию оказался кресс-салат – во всех концентрациях проявляется ингибирование, за исключением 5 г/л (рис. 7). У редиса при 5 г/л проявляется стимулирующий эффект, при 10 и 50 г/л – нейтральный, а ингибирование проявляется только при самой высокой концентрации. Морковь также наиболее чувствительна только при 100 г/л. При концентрациях 5 и 10 г/л растения моркови не чувствительны к воздействию экстракта, а при 50 г/л проявляется некоторый стимулирующий эффект. Таким образом, не все культуры одинаково чувствительны к воздействию аллелохимических веществ, если брать в качестве индикатора удлинение корня проростка.

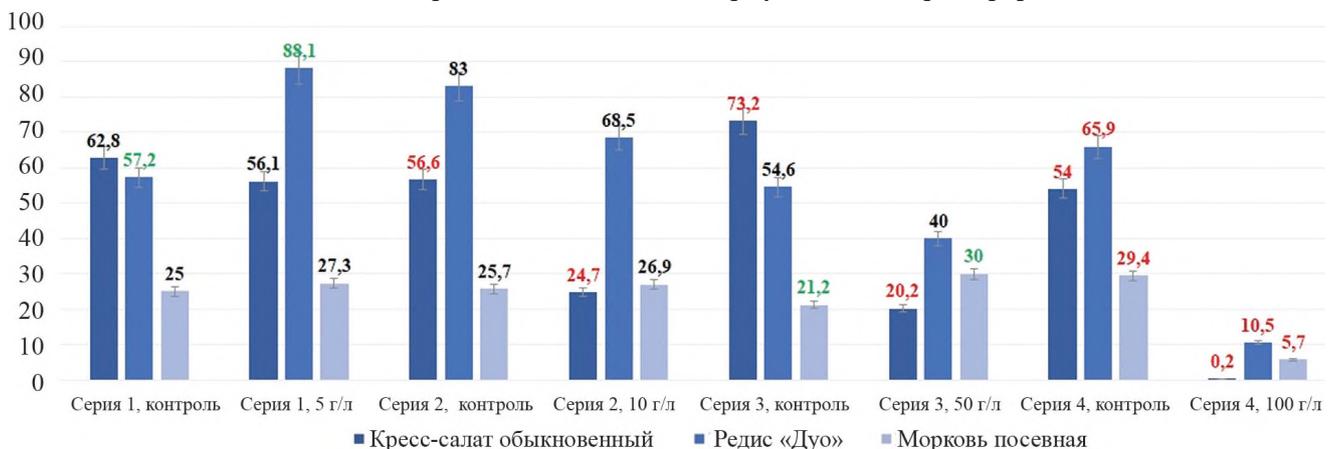


Рис. 7. Длина корней тест-объектов (мм), выросших на экстракте из фитомассы *R. pseudoacacia*, не находившейся под дождем

Fig. 7. The length of the germling roots of test objects (mm) grown on extracts from *R. pseudoacacia* phytomass that was not exposed to rain

Экстракты из фитомассы робинии, приготовленной способом 2, воздействуют следующим образом: у кресс-салата при концентрации 5 г/л наблюдается нейтральный эффект (рис. 8). Ингибирование проявляется уже при 10 г/л и усиливается при повышении концентрации. Но по сравнению с предыдущим экспериментом, не наблюдается такого ярко выраженного ингибирования при концентрации 100 г/л. Для редиса выявлен нейтральный, а при концентрации 10 г/л – стимулирующий эффект. Для моркови также не выявлено ингибирование, а только стимулирующий (при 5 и 50 г/л) или нейтральный (при 10 и 100 г/л) эффекты. В целом, при сравнении с предыдущим опытом, данные свидетельствуют о том, что фитомасса, приготовленная способом 2, более безопасна для потенциального использования в качестве мульчи как обладающая менее выраженным аллелопатическим эффектом.

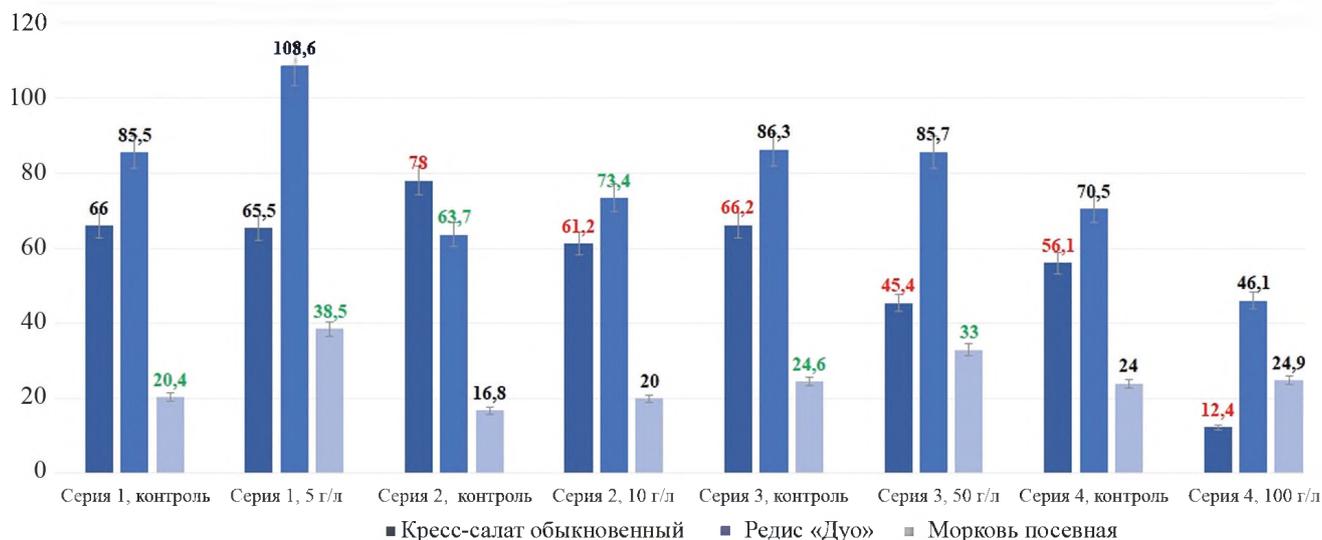


Рис. 8. Длина корней тест-объектов (мм), выросших на экстракте из фитомассы *R. pseudoacacia*, выдержанной под дождем

Fig. 8. The length of the germling roots of test objects (mm) grown on extracts from *R. pseudoacacia* phytomass weathered by rain

Влияние экстрактов на длину гипокотилия проростков. Экстракты из фитомассы *A. negundo*, подготовленной способом 1, обладают хорошо выраженным аллелопатическим эффектом в высоких концентрациях (рис. 9). При концентрации 5 г/л данный тип фитомассы оказался нейтральным для всех трех видов. При 10 г/л проявляется ингибирование роста гипокотилей кресс-салата, но для редиса и моркови эффект по-прежнему остается нейтральным. С повышением концентрации ингибирование заметно усиливается. При 50 г/л наблюдается незначительное развитие гипокотилия только у кресс-салата и редиса.

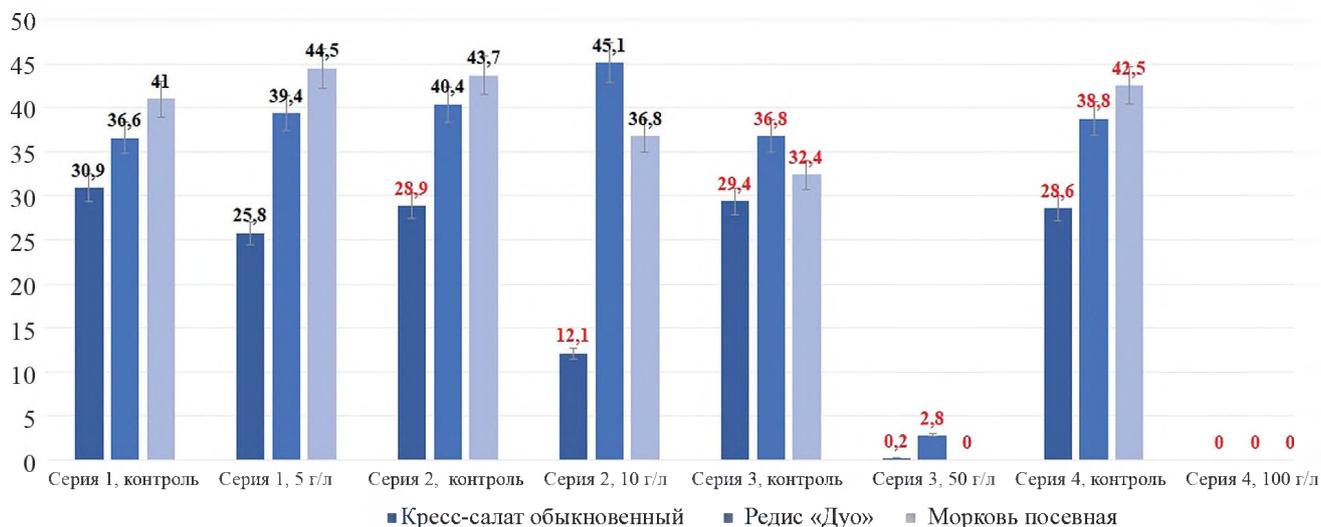


Рис. 9. Длина гипокотилей тест-объектов (мм), выросших на экстракте из фитомассы *A. negundo*, не находившейся под дождем

Fig. 9. The length of hypocotyls of test objects (mm) grown on extracts from *A. negundo* phytomass that was not exposed to rain

Развитие гипокотилия на фоне экстракта из фитомассы клена, приготовленной способом 2, демонстрирует следующие закономерности (рис. 10): при концентрации 5 г/л ингибирование отсутствует, наблюдаются только нейтральный (у кресс-салата и редиса) и стимулирующий (у моркови) эффекты. При 10 г/л происходит ингибирование роста гипокотилей кресс-салата, для редиса и моркови эффект не изменяется. При более высоких концентрациях выявлено только ингибирование, причем для кресс-салата и моркови – полное ингибирование роста гипокотилей. При сравнении картин влияния на длину гипокотилей (рис 9, 10) видны те же закономерности, что в аналогичном эксперименте по длине корней: аллелопатический потенциал фитомассы, которая была под воздействием атмосферных осадков, снижается.

Экстракты из фитомассы *R. pseudoacacia*, подготовленной способом 1, при концентрации 5 г/л стимулируют рост гипокотилей кресс-салата и редиса, для моркови – нейтральны (рис. 11). Воздействие данной

фитомассы при 10 г/л нейтрально для всех трех видов. При 50 г/л ингибирование проявляется только у кресс-салата, в то же время для остальных культур воздействие остается нейтральным. При максимальной концентрации наблюдается только эффект ингибирования, причем наиболее ярко для кресс-салата.

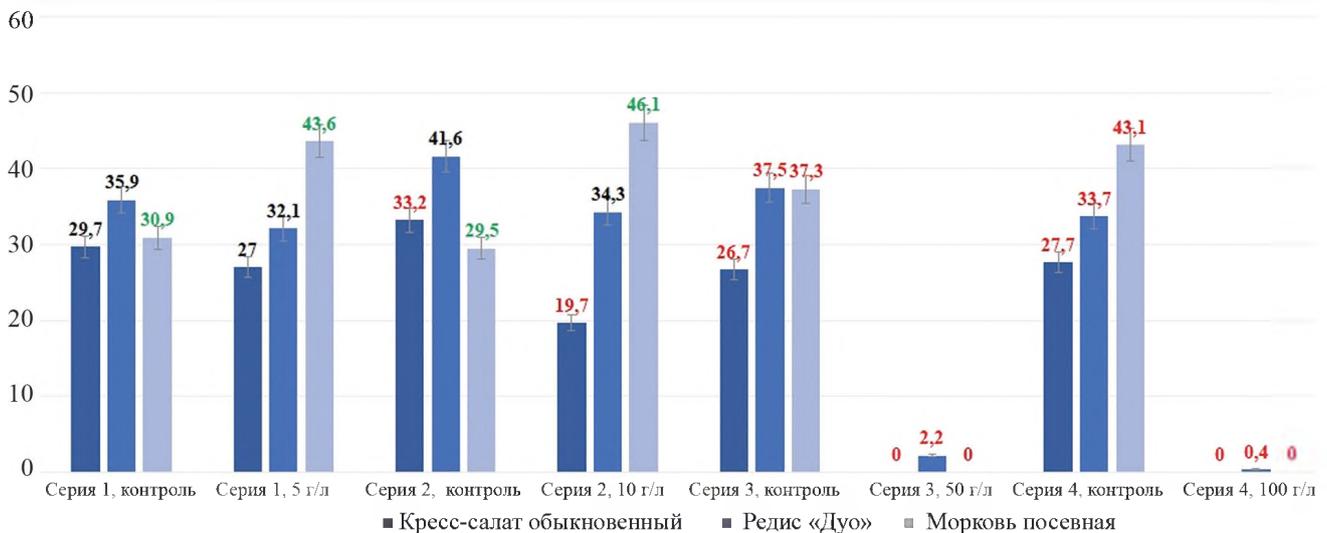


Рис. 10. Длина гипокотилей тест-объектов (мм), выросших на экстракте из фитомассы *A. negundo*, выдержанной под дождем

Fig. 10. The length of the hypocotyls of test objects (mm) grown on extracts from *A. negundo* phytomass weathered by rain

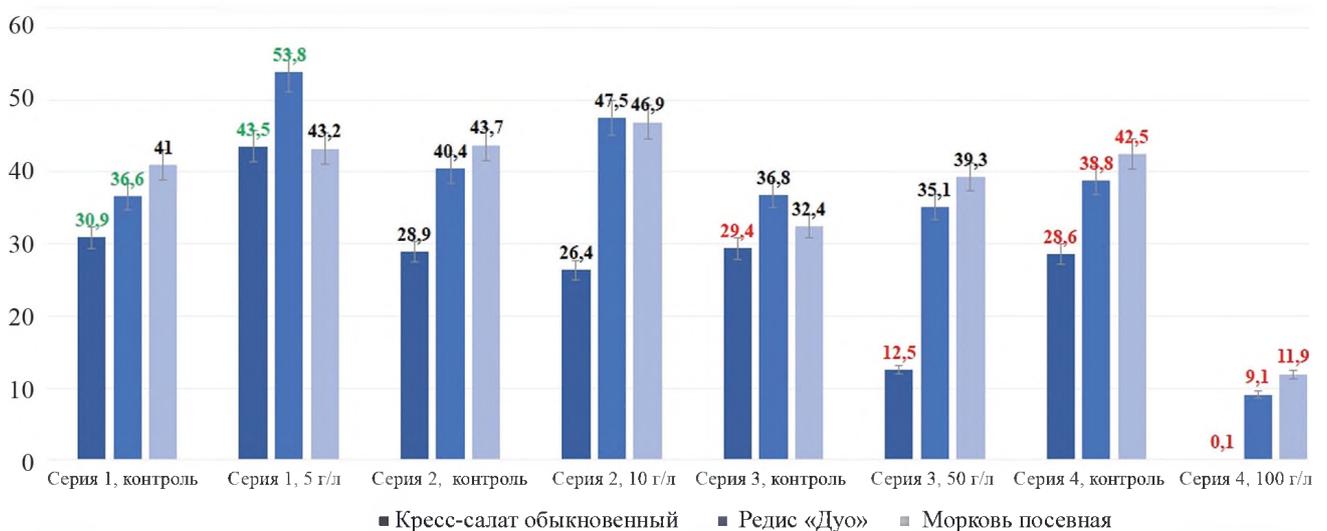


Рис. 11. Длина гипокотилей тест-объектов (мм), выросших на экстракте из фитомассы *R. pseudoacacia*, не находившейся под дождем

Fig. 11. The length of the hypocotyls of test objects (mm) grown on extracts from *R. pseudoacacia* phytomass that was not exposed to rain

Экстракты из фитомассы робинии, приготовленной способом 2, воздействуют следующим образом: при концентрации 5 г/л происходит стимулирование роста гипокотилей всех тест-культур (рис. 12). При 10 г/л стимулирование сохраняется у кресс-салата, воздействие на редис и морковь нейтрально. При 50 г/л стимулирование проявляется у кресс-салата и редиса, воздействие на морковь нейтрально. При максимальной концентрации наблюдается эффект ингибирования роста гипокотилей кресс-салата и моркови, влияние на редис нейтрально. Таким образом, фитомасса, приготовленная способом 2, больше подходит для потенциального использования в качестве мульчи, поскольку вытяжка из нее демонстрирует стимуляцию роста гипокотилей.

Наибольший интерес представляют результаты, показывающие стимулирующий эффект. В таблице представлена статистическая обработка таких результатов с помощью *t*-критерия Стьюдента при сравнении средних арифметических (контрольных и опытных образцов) по всем исследуемым параметрам (количество проросших растений, длина корней и гипокотилей растений). Все значения *t*-критерия статистически достоверны, $p < 0,05$.

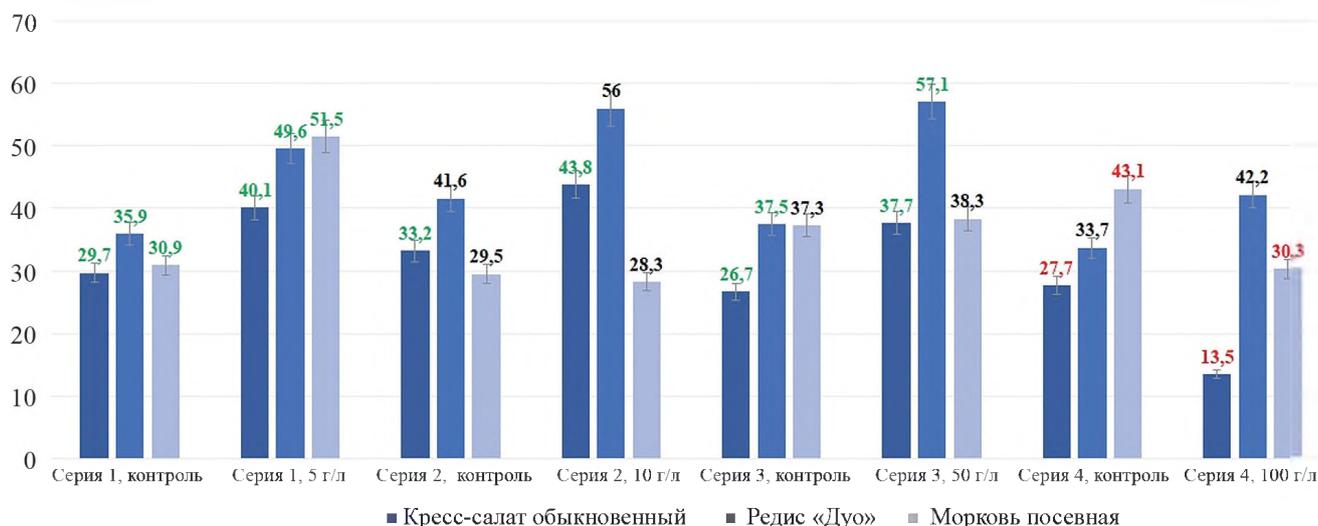


Рис. 12. Длина hypocотилей тест-объектов (мм), выросших на экстракте из фитомассы *R. pseudoacacia*, выдержанной под дождем

Fig. 12. The length of hypocotyls of test objects (mm) grown on extracts from *R. pseudoacacia* phytomass weathered by rain

Стимулирующие эффекты экстрактов листовой фитомассы инвазивных видов на развитие проростков тест-культур

Stimulating effects of leaf phytomass extracts of invasive species on the development of seedlings of test cultures

Тест-объект, концентрация, вид экстракта	Значение, полученное в результате эксперимента		Значение <i>t</i> -критерия Стьюдента	<i>p</i>
	контроль	опыт		
Количество проросших растений, шт.				
Морковь посевная, 5 г/л, <i>A. negundo</i> (д)*	24	30	3,45	0,41
Длина корешка растений, мм				
Морковь посевная, 10 г/л, <i>A. negundo</i> (д)	16,8	30,9	4,04	0,0002
Редис «Дуо», 5 г/л, <i>R. pseudoacacia</i>	57,2	88,1	2,60	0,01
Морковь посевная, 50 г/л, <i>R. pseudoacacia</i>	21,2	30	2,38	0,02
Морковь посевная, 5 г/л, <i>R. pseudoacacia</i> (д)	20,4	38,5	4,22	0,00009
Редис «Дуо», 10 г/л, <i>R. pseudoacacia</i> (д)	63,7	73,4	0,71	0,48
Морковь посевная, 50 г/л, <i>R. pseudoacacia</i> (д)	24,6	33	2,16	0,03
Длина hypocотилей растений, мм				
Морковь посевная, 5 г/л, <i>A. negundo</i> (д)	30,9	43,6	2,45	0,02
Морковь посевная, 10 г/л, <i>A. negundo</i> (д)	29,5	46,1	3,09	0,003
Кресс-салат, 5 г/л, <i>R. pseudoacacia</i>	30,9	43,5	3,18	0,002
Редис «Дуо», 5 г/л, <i>R. pseudoacacia</i>	36,6	53,8	2,78	0,007
Кресс-салат, 5 г/л, <i>R. pseudoacacia</i> (д)	29,7	40,1	2,37	0,02
Редис «Дуо», 5 г/л, <i>R. pseudoacacia</i> (д)	35,9	49,6	2,11	0,04
Морковь посевная, 5 г/л, <i>R. pseudoacacia</i> (д)	30,9	51,5	3,81	0,0003
Кресс-салат, 10 г/л, <i>R. pseudoacacia</i> (д)	33,2	43,8	2,98	0,004
Кресс-салат, 50 г/л, <i>R. pseudoacacia</i> (д)	26,7	37,7	2,5	0,02
Редис «Дуо», 50 г/л, <i>R. pseudoacacia</i> (д)	37,5	57,1	2,11	0,04

* (д) – фитомасса, выдержанная под дождем

Известно, что все типы выделений наиболее активны в листьях, менее в стеблях, еще менее в корнях [12]. Исходя из этого, выбранная нами для исследования листовая фитомасса должна в наибольшей степени показывать аллелопатическое действие *A. negundo* и *R. pseudoacacia* на другие растения.

В целом в наших экспериментах действие водных вытяжек на проростки модельных культур показывает, что *A. negundo* обладает большей ингибирующей аллелопатической активностью по сравнению с *R. pseudoacacia*. Это наблюдается при сравнении всех рассмотренных показателей: количества проросших семян тест-объектов, длины их корешков, длины hypocотилей. В то же время в работе [9] отмечается

примерно одинаковый аллелопатический потенциал для *A. negundo* и *R. pseudoacacia* в экспериментах с проростками *Sinapis alba* при использовании вытяжек из фитомассы 10 и 50 г/л, настоенной на воде в течение часа. В исследованиях других авторов не отмечается фактов стимулирующего влияния экстракта из фитомассы *A. negundo* на развитие проростков *in vitro* [7; 9; 10], однако обнаружено положительное влияние на всхожесть семян *Melilotus affinis* и *Poa pratensis* вытяжки из почвы, взятой под кроной *Acer negundo* [17]. Также не отмечалось стимулирующего эффекта при каких-либо концентрациях экстракта из листьев *R. pseudoacacia* на развитие проростков овощных и луговых культур [11].

Для окончательных выводов о применении фитомассы данных древесных инвазионных видов в качестве мульчи в садоводстве и огородничестве необходим полевой эксперимент, так как наблюдаемые закономерности в лаборатории и в поле могут заметно отличаться [18]. Тем не менее, уже на основе наших экспериментов *in vitro* можно сделать вывод, что фитомасса, выдержанная непродолжительное время под дождем, снижает свое ингибирующее действие на растения. Для применения мульчи нужно учитывать также видоспецифическое действие аллелопатически активных веществ [19] и проверять фитомассу на каждой культуре отдельно. Поскольку в наших экспериментах небольшие концентрации вытяжек оказывали как ингибирующий, так нейтральный и даже стимулирующий эффект, то будет иметь значение количество фитомассы, вносимой на единицу площади под конкретную культуру. При этом можно взять за основу, что концентрации фитомассы в экспериментах *in vitro* из расчета от 5 до 20 г/л наиболее соответствуют концентрации аллелопатических веществ в подстилке и почве в естественных условиях [20]. Ингибирующее действие фитомассы можно использовать для подавления развития нежелательных растений, в том числе травянистых сорняков.

Заключение

Клен ясенелистный обладает большей ингибирующей аллелопатической активностью (фитотоксичностью), чем робиния лжеакация. В частности, при концентрации 100 г/л вытяжка из листьев клена полностью подавляла прорастание семян кресс-салата, редиса и моркови, а вытяжка из листьев робинии оказывала нейтральный эффект (статистически несущественно снижала всхожесть семян) в отношении редиса и моркови. Экстракт из клена во всех концентрациях подавлял рост корешка у редиса, а экстракт из робинии в тех же концентрациях оказывал нейтральное или слегка стимулирующее действие на развитие корешка.

Как правило, эффект ингибирования развития проростков по трем изученным параметрам (процент проросших семян, длина корешка и гипокотили) увеличивается с повышением концентрации вытяжки. Исключение составляет удлинение корешков проростков моркови, которое слегка стимулировалось вытяжкой из клена 10 г/л и робинии 50 г/л.

Заготовленная фитомасса *A. negundo* и *R. pseudoacacia* под воздействием дождя частично теряет свои ингибирующие аллелопатические свойства. Например, после выдержки под дождем листья *A. negundo* проявляют (при концентрации экстракта 10 г/л) в 2,3 раза меньший эффект угнетения роста корешков у кресс-салата.

В отдельных случаях вытяжки из листьев (фитомасса, выдержанная под дождем) имеют стимулирующий эффект на развитие проростков: экстракт из клена 5 г/л повышал всхожесть семян моркови на 25 %; экстракт из робинии 5 г/л вызывал удлинение корешка у проростков моркови в 1,9 раза; экстракты из робинии 5–50 г/л вызывали удлинение гипокотили у кресс-салата в 1,3–1,4 раза. В случаях стимулирования экстракты из листьев *R. pseudoacacia* оказывают более сильный эффект на развитие проростков, чем экстракты из листьев *A. negundo*, в особенности в отношении длины гипокотилей.

Разные культуры по-разному чувствительны к воздействию аллелохимических веществ. В частности, экстракт из робинии 100 г/л снижал всхожесть семян кресс-салата до 3,8 %, а моркови – до 89,3 %. Экстракт из листьев робинии, выдержанных под дождем, уменьшал среднюю длину корешка у кресс-салата – в 4,5 раза, а у редиса – в 1,5 раза.

Библиографические ссылки

1. Дубовик ДВ, Дмитриева СА, Ламан НА и др. *Черная книга флоры Беларуси: чужеродные вредоносные растения*. Минск: Беларуская навука; 2020. 407 с.
2. Дубовик ДВ, Лебедько ВН, Парфенов ВИ и др. *Растения-агрессоры. Инвазионные виды на территории Беларуси*. Минск: Беларуская Энцыклапедыя імя Петруся Броўкі; 2017. 192 с.
3. Соколов АС, Шпилевская НС. Распространение инвазивных видов как глобальная и региональная экологическая проблема. *Геаграфія*. 2020;6:26–38.
4. Бордок ИВ, Владимиров ИИ, Власов БП и др. *Мониторинг растительного мира в Республике Беларусь: результаты и перспективы*. Минск: Беларуская навука; 2019. 491 с.
5. Мялик АН, Галуц ОА. Хозяйственное значение инвазионных видов растений Белорусского Полесья. *Прыроднае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця*. 2016;9:24–28.
6. Яхновец МН. Проблема древесных фитоинвазий во флоре Белорусского Полесья. В: *Пинские чтения: материалы I международной научно-практической конференции*. Пинск: [б. и.]; 2022. с. 433–435.
7. Лазарева ДД, Калашников ДВ. Аллелопатическое влияние клена ясенелистного (*Acer negundo*) в условиях Москвы. *Вестник ландшафтной архитектуры*. 2017;10:53–58.

8. Еременко ЮА. Аллелопатические свойства адвентивных видов древесно-кустарниковых растений. *Промышленная ботаника*. 2012;12:188–193.
9. Csiszár Á. Allelopathic effects of invasive woody plant species in Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*. 2009;5:9–17.
10. Панасенко НН, Володин ВВ, Володченко ЮС и др. Аллелопатические свойства *Acer negundo*. *Ежегодник НИИ фундаментальных и прикладных исследований Брянского государственного университета*. Брянск: [б. и.]; 2018. с. 34–36.
11. Nasir H, Iqbal Z, Hiradate S et al. Allelopathic potential of *Robinia pseudo-acacia* L. *Journal of Chemical Ecology*. 2005;9:2179–2192.
12. Гродзинский АМ. Аллелопатия растений и почвоутомление. Киев: Наукова думка; 1994. 432 с.
13. Изоткин ДИ, Холенко МС. Влияние экстрактов из *Fraxinus excelsior* L. и *Fraxinus pennsylvanica* March. на параметры роста кресс-салата. *Ученые записки Брянского государственного университета*. 2020;1:54–59.
14. Александров ДС, Калашников ДВ. Влияние экстрактов листового опада березы и кленов на прорастание семян и начальные этапы роста газонных культур. *Вестник ландшафтной архитектуры*. 2019;17:3–6.
15. Камалтдинова АР. Использование растений в качестве тест-объекта в оценке загрязнения почвы. *Матрица научного познания*. 2019;6:53–56.
16. Доспехов БА. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*. Москва: Агропромиздат; 1985. 351 с.
17. Цандекова ОЛ. Роль аллелопатического влияния *Acer negundo* L. на рост травянистых растений. *Вестник Нижневартковского государственного университета*. 2020;1:15–18.
18. Гродзинский АМ. *Основи хімічної взаємодії рослин*. Київ: Наукова думка; 1973. 207 с.
19. Кондратьев МН, Ларикина ЮС, Бударин СН и др. Роль инвазивности растительных видов при внедрении в естественные и агроэкосистемы. *Тобольск научный*. Тобольск: [б. и.]; 2013. с. 128–132.
20. Мороз ПА. *Аллелопатия в плодовых садах*. Киев: Наукова думка; 1990. 208 с.

References

1. Dubovik DV, Dmitrieva SA, Laman NA et al. *Chernaya kniga flory Belarusi: chuzherodnye vredonosnye rasteniya* [Black book of Belarus flora: alien harmful plant species]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2020. 407 p. Russian.
2. Dubovik DV, Lebed'ko VN, Parfenov VI et al. *Rasteniya-agressory. Invazionnye vidy na territorii Belarusi* [Aggressive plants. Invasive species on the territory of Belarus]. Minsk: Belaruskaya Entsyklopedyya imya Petrusya Browki; 2017. 192 p. Russian.
3. Sokolov AS, Shpilevskaya NS. *Rasprostranenie invazivnykh vidov kak global'naya i regional'naya ekologicheskaya problema* [The spread of invasive species as a global and regional ecological problem]. *Geografiya* [Geography]. 2020;6:26–38. Russian.
4. Bordok IV, Vladimirova IN, Vlasov BP et al. *Monitoring rastitel'nogo mira v Respublike Belarus': rezul'taty i perspektivy* [Flora monitoring in the Republic of Belarus: results and prospects]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2019. 491 p. Russian.
5. Myalik AN, Galuts OA. *Khozyaistvennoe znachenie invazionnykh vidov rastenii Belorusskogo Poles'ya* [Economic importance of invasive plant species of Belarusian Polesie]. *Pryrodnae asyaroedze Paleessya: asablivasci i perspektivy razvycyia* [Natural environment of Polesie: features and prospects of development]. 2016;9:24–28. Russian.
6. Yakhnovets MN. *Problema drevesnykh fitoinvazii vo flore Belorusskogo Poles'ya* [The problem of tree phytointvasions in the flora of Belarusian Polesie]. In: *Pinskies chteniya: materialy I mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Pinsk Readings: Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference]. Pinsk: [publisher unknown]; 2022. p. 433–435. Russian.
7. Lazareva DD, Kalashnikov DV. *Allelopaticheskoe vliyanie klena yasenelistnogo (Acer negundo) v usloviyakh Moskvy. Vestnik landshaftnoi arkhitektury* [Allelopathic influence of ash-leaved maple (*Acer negundo*) in environment of Moscow]. *Vestnik landshaftnoi arkhitektury* [Bulletin of landscape architecture]. 2017;10:53–58. Russian.
8. Yeriomenko YuA. *Allelopaticheskie svoystva adventivnykh vidov drevesno-kustarnikovyykh rastenii* [Allelopathic features of the adventitious woody and shrub plants]. *Promyshlennaya botanika* [Industrial Botany]. 2012;12:188–193. Russian.
9. Csiszár Á. Allelopathic effects of invasive woody plant species in Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*. 2009;5:9–17.
10. Panasenka NN, Volodin VV, Volodchenko YuS. *Allelopaticheskie svoystva Acer negundo* [Allelopathic properties of *Acer negundo*]. *Ezhegodnik NII fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Annals of the Research Institute for Fundamental and Applied Research of the Bryansk State University]. Bryansk: [publisher unknown]; 2018. p. 34–36. Russian.
11. Nasir H, Iqbal Z, Hiradate S et al. Allelopathic potential of *Robinia pseudo-acacia* L. *Journal of Chemical Ecology*. 2005;9:2179–2192.
12. Grodzinskiy AM. *Allelopatiya rastenii i pochvoutomlenie* [Plant allelopathy and soil fatigue]. Kiev: Naukova dumka; 1994. 432 p. Russian.
13. Izotkin DI, Kholenko MS. *Vliyanie ekstraktov iz Fraxinus excelsior L. i Fraxinus pennsylvanica March. na parametry rosta kress-salata* [Effect of extracts from *Fraxinus excelsior* L. and *Fraxinus pennsylvanica* March. on watercress growth parameters]. *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific Notes of Bryansk State University]. 2020;1:54–59. Russian.
14. Aleksandrov DS, Kalashnikov DV. *Vliyanie ekstraktov listovogo opada berezy i klenov na prorastanie semyan i nachal'nye etapy rosta gazonnykh kul'tur* [Influence of birch and maple leaf litter extracts on seed germination and initial stages of lawn crops growth]. *Vestnik landshaftnoi arkhitektury* [Bulletin of landscape architecture]. 2019;17:3–6. Russian.
15. Kamaltdinova AR. *Ispol'zovanie rastenii v kachestve test-ob'ekta v otsenke zagryazneniya pochvy* [The use of plants as a test object in the assessment of soil pollution]. *Matritsa nauchnogo poznaniya* [Matrix of scientific knowledge]. 2019;6:53–56. Russian.
16. Dospikhov BA. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Methodology of field experiment (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow: Agropromizdat; 1985. 351 p. Russian.
17. Tsandekova OL. *Rol' allelopaticheskogo vliyaniya Acer negundo L. na rost travyanistykh rastenii* [The role of the allelopathic influence of *Acer negundo* L. on the growth of herbaceous plants]. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Nizhnevartovsk State University]. 2020;1:15–18. Russian.
18. Grodzinskiy AM. *Osnovy himichnoi' vzajemodii' roslin* [The basics of chemical interactions between plants]. Kyi'v: Naukova dumka; 1973. 207 p. Ukrainian.
19. Kondrat'ev MN, Larikova YuS, Budarin SN et al. *Rol' invazivnosti rastitel'nykh vidov pri vnedrenii v estestvennye i agroekosistemy* [The role of invasiveness of plant species when introduced into natural and agroecosystems]. *Tobol'sk nauchnyi* [Tobolsk scientific]. Tobolsk: [publisher unknown]; 2013. p. 128–132. Russian.
20. Moroz PA. *Allelopatiya v plodovykh sadakh* [Allelopathy in orchards]. Kiev: Naukova dumka; 1990. 208 p. Russian.

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 539.163:546.36:[582.29+582.32]:630

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОГО И СТАБИЛЬНОГО ЦЕЗИЯ В ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

**В. Н. СЕГЛИН¹⁾, Н. В. ШАМАЛЬ¹⁾, Р. С. КУРИЛЕНКО¹⁾, Р. А. КОРОЛЬ¹⁾,
А. А. ДВОРНИК¹⁾, А. Н. НИКИТИН¹⁾, Ю. К. СИМОНЧИК¹⁾, Н. И. ТИМОХИНА¹⁾**

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

Образец цитирования:

Сеглин ВН, Шамаль НВ, Куриленко РС, Король РА, Дворник АА, Никитин АН, Симончик ЮК, Тимохина НИ. Распределение радиоактивного и стабильного цезия в почвах и растениях лесных экосистем. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;1:32–41. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-32-41>

For citation:

Seglin VN, Shamal NV, Kurilenko RS, Korol RA, Dvornik AA, Nikitin AN, Simonchik YuC, Tsimokhina NI. Distribution of radioactive and stable cesium in soils and plants of forest ecosystems. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;1:32–41. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-32-41>

Авторы:

Вероника Николаевна Сеглин – младший научный сотрудник лаборатории моделирования и минимизации антропогенных рисков.

Наталья Владимировна Шамаль – старший научный сотрудник лаборатории моделирования и минимизации антропогенных рисков.

Роман Сергеевич Куриленко – младший научный сотрудник лаборатории моделирования и минимизации антропогенных рисков.

Раиса Александровна Король – научный сотрудник лаборатории моделирования и минимизации антропогенных рисков.

Александр Александрович Дворник – кандидат биологических наук; заведующий лабораторией моделирования и минимизации антропогенных рисков.

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

Юлия Константиновна Симончик – младший научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.

Наталья Ильинична Тимохина – кандидат биологических наук; заведующий отделом качества окружающей среды и продуктов питания.

Authors:

Veronika N. Seglin, junior researcher at the laboratory of modeling and anthropogenic risks minimization.

seglinv@mail.ru

Natalia V. Shamal, senior researcher at the laboratory of modeling and anthropogenic risks minimization.

namahasha@rambler.ru

Roman S. Kurilenko, junior researcher at the laboratory of modeling and anthropogenic risks minimization.

kr.socialmail@gmail.com

Raisa A. Korol, researcher at the laboratory of modeling and anthropogenic risks minimization.

raisa-korol@mail.ru

Aleksander A. Dvornik, PhD (biology); head of the laboratory for modeling and minimizing anthropogenic risks.

aadvornik@gmail.com

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

nikitin@irb.basnet.by

Yuliya C. Simonchyk, junior researcher at the laboratory of modeling and anthropogenic risks minimization.

simonagomel@yandex.ru

Natalia I. Tsimokhina, PhD (biology); head of the department of environmental and food quality.

natim-2006@tut.by

В исследовании представлены результаты определения содержания радиоактивного (^{137}Cs) и стабильного (^{133}Cs) изотопов цезия в почвенных и растительных образцах (лишайники, мхи, кора, древесина), собранных в средневозрастном сосновом лесу на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ), а также результаты эксперимента по оценке выпадений ^{137}Cs на горизонтальные планшеты. Рассчитаны соотношения концентраций ^{137}Cs к ^{133}Cs , которые могут быть использованы для количественной оценки уровня равновесия между ^{137}Cs и ^{133}Cs в лесных экосистемах. Исходя из предположения, что физико-химические свойства ^{133}Cs и ^{137}Cs схожи, анализ ^{133}Cs и сравнение его соотношений с ^{137}Cs может быть полезен для понимания долгосрочного поведения радионуклида и его равновесного распределения в лесных экосистемах. В результате проведенных исследований установлено, что активность выпадений ^{137}Cs в составе древесного опада выше в сравнении с атмосферными выпадениями радионуклида на горизонтальные планшеты. В осенний сезон отмечается снижение среднесуточных значений активности ^{137}Cs в пробах радиоактивных выпадений из атмосферы и увеличение в древесном опаде. При этом более половины общей активности радионуклида приходится на долю древесного опада. Проведено сравнение вертикального распределения обменной формы ^{137}Cs и ^{133}Cs в минеральных слоях лесной почвы. Общее содержание ^{137}Cs в почвенном профиле снижается с глубиной. Содержание обменной формы ^{137}Cs в почвенном профиле имеет неравномерное распределение, а концентрация обменной формы стабильного изотопа с глубиной возрастает. Соотношения $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ в почвенном профиле уменьшаются с глубиной от горизонта 0–5 см к горизонту 15–20 см, что свидетельствует о неравновесном соотношении этих изотопов. Показано, что содержание ^{137}Cs и ^{133}Cs в лишайниках, мхах, коре и древесине различается в зависимости от вида образца и части растения. Самая высокая активность ^{137}Cs отмечена для лишайников и мхов. В условиях совместного произрастания мхи характеризуется более высокой концентрацией ^{133}Cs в сравнении с лишайниками. Отмечена хорошая корреляционная взаимосвязь между содержанием ^{137}Cs и ^{133}Cs для каждого вида растительного образца. Этот результат предполагает вывод, что данные растения поглощают ^{137}Cs аналогично ^{133}Cs .

Ключевые слова: почва; лишайник; мох; сосновый лес; радиоактивный цезий; стабильный цезий; изотопное отношение.

DISTRIBUTION OF RADIOACTIVE AND STABLE CESIUM IN SOILS AND PLANTS OF FOREST ECOSYSTEMS

V. N. SEGLIN^a, N. V. SHAMAL^a, R. S. KURILENKO^a, R. A. KOROL^a,
A. A. DVORNIK^a, A. N. NIKITIN^a, Yu. C. SIMONCHIK^a, N. I. TSIMOKHINA^a

^a*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus,
4 Fiadjuninskaga Street, Gomel 246007, Belarus
Corresponding author: V. N. Seglin (seglinv@mail.ru)*

The paper presents the results of determining the content of radioactive (^{137}Cs) and stable (^{133}Cs) isotopes of cesium in soil and plant samples (lichens, mosses, bark, wood) collected in a medium-aged pine forest on the territory of the Polesye State Radiation-Ecological Reserve, as well as the results of the experiment to assess the vertical precipitation of ^{137}Cs on horizontal plates. The ratios of concentrations of ^{137}Cs to ^{133}Cs have been calculated, which can be used to quantify the level of equilibrium between ^{137}Cs and ^{133}Cs in the forest ecosystems. Based on the assumption that the physicochemical properties of ^{133}Cs and ^{137}Cs are similar, the analysis of ^{133}Cs and comparison of its ratios with ^{137}Cs can be useful for understanding the long-term behavior of the radionuclide and its equilibrium distribution in forest ecosystems. As a result of the conducted research, it was established that the precipitation activity of ^{137}Cs in the composition of tree litter is higher in comparison with the atmospheric precipitation of the radionuclide on horizontal plates. In the autumn season, there is a decrease in the average daily values of ^{137}Cs activity observed in the samples of radioactive fallout from the atmosphere and an increase in the tree litter samples. At the same time, more than half of the total activity of the radionuclide is retained by the tree litter. The vertical distribution of the ^{137}Cs exchange form in the forest soil's mineral layers was compared to that of ^{133}Cs . The total content of ^{137}Cs in the soil profile decreases with depth. The content of the ^{137}Cs exchange form in the soil profile has an uneven distribution, and the concentration of the stable isotope's exchange form increases with depth. The ^{137}Cs to ^{133}Cs ratios in the soil profile decrease with a soil depth from the horizon of 0–5 cm to the horizon of 15–20 cm, which indicates a nonequilibrium ratio of these isotopes. It is shown that the content of ^{137}Cs and ^{133}Cs in lichens, mosses, bark and wood varies depending on the type of a sample and the part of a plant. The highest activity values of ^{137}Cs were determined in lichens and mosses. Under conditions of co-growth, mosses are characterized by a higher concentration of ^{133}Cs when compared to lichens. A good correlation was noted between the content of ^{137}Cs and ^{133}Cs for all types of the plant samples. This result suggests the conclusion that these plants absorb ^{137}Cs similarly to ^{133}Cs .

Keywords: soil; lichen; moss; pine forest; radioactive cesium; stable cesium; isotopic ratio.

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС привела к широкомасштабному загрязнению радионуклидами значительных территорий Республики Беларусь [1]. Существенная доля выброшенных в атмосферу радиоактивных веществ (около 80 %) в первые дни после аварии была задержана лесными насаждениями [2]. В то же время лес способен перераспределять и аккумулировать радионуклиды, препятствуя их дальнейшему распространению [1; 3–5]. После аварии прошло 36 лет, однако лесные биогеоценозы продолжают сохранять высокий уровень радиоактивного загрязнения, а миграция радионуклидов в компонентах этих экосистем проходит несколько динамических стадий: накопление, стабилизация и постепенное снижение [3].

Однако долгосрочное прогнозирование поведения радионуклидов в естественных лесных экосистемах затруднительно. Причиной является изменение скорости вертикальной миграции и биологической доступности радионуклидов со временем [6]. В почвенно-растительном покрове миграция и порядок распределения техногенных радионуклидов связан с поведением их изотопных и неизотопных аналогов, что позволяет делать прогноз миграции радионуклидов на основании распределения стабильных химических элементов и использовать радионуклиды для анализа поведения их изотопных и неизотопных носителей в биогеохимических исследованиях [7; 8]. Таким образом, анализ поведения стабильных элементов и сравнение их соотношений с радиоизотопами-аналогами может дать информацию о долгосрочном поведении радионуклидов, что позволит прогнозировать изменение уровней радиоактивного загрязнения экосистем и скоростей миграции радионуклида, а также время самоочищения лесных экосистем [6].

Сопряженный анализ распределения техногенного ^{137}Cs и ^{133}Cs проводился для почв, подстилки, грибов и растений в различных лесных экосистемах [9–12], загрязненных в результате чернобыльских и глобальных выпадений. Описанное в ряде работ равновесие в биогеохимических циклах ^{137}Cs и ^{133}Cs зафиксировано на примере отдельных видов грибов и мхов уже через 10–20 лет после чернобыльских выпадений [9]. Но с другой стороны, в этих исследованиях отмечается, что отношение $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ может существенно изменяться в разнообразных лесных экотопах. В исследованиях Йошида и др. [13; 14] анализ данных для грибов, собранных в шести разных лесах, показал хорошую корреляцию между концентрациями ^{137}Cs и ^{133}Cs для каждого участка леса независимо. Однако взаимосвязь во всей лесной экосистеме, включая другие биологические образцы, такие как растения, не изучалась.

Было установлено, что соотношение $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ подходит для разграничения различных слоев лесной почвы [10]. Когда коэффициенты переноса ^{137}Cs и ^{133}Cs аналогичны, соотношения $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ в образцах почвы могут быть использованы для идентификации тех слоев почвы, из которых преимущественно поглощается цезий, аналогично методу, показанному [15] для соотношения $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$. Этот подход, однако, ограничен случаем, когда два изотопа не достигли динамического равновесия. Исходя из предположения, что ^{133}Cs достиг динамического равновесия в исследуемой экосистеме, отмечается, что распределение ^{133}Cs в органических слоях почвы и в подлеске представляет собой распределение, которое с поправкой на распад радиоактивного цезия также достигнет равновесия через несколько десятилетий после осадения. Был сделан вывод, что анализ текущего распределения ^{133}Cs в экосистемах может быть подходящим способом для проверки долгосрочных прогнозов передовых радиоэкологических моделей для лесных экосистем.

В 2011–2013 гг. в дальневосточной части России (острова Сахалин и Курилы) были проведены исследования накопления ^{137}Cs и ^{134}Cs в слоевищах лишайников от аварийных выбросов на АЭС Фукусима. Показаны отношения двух радиоактивных изотопов цезия, а также описана возможность использования лишайников как индикаторов ретроспективной динамики загрязнения [16]. Способность эффективно аккумулировать и длительное время удерживать в своей биомассе радионуклиды дает основание на протяжении многих десятилетий использовать мхи и лишайники в качестве биомониторов для изучения атмосферных выпадений радионуклидов [17–20]. Целью для такого биомониторинга могут быть как местные, так и отдаленные источники загрязнения.

Однако изотопные отношения актуальны не только в отношении радиоактивных элементов. Ввиду того, что химическое поведение ^{137}Cs должно быть практически идентичным поведению ^{133}Cs , сравнительный анализ равновесных концентраций ^{137}Cs и его стабильного аналога может дать информацию для понимания механизма накопления радионуклида в лишайниках и мхах. Исследования, проведенные Йошидой и Мураматсу на представителях мохообразных, грибов и одиночных лишайников, показали возможность использования соотношений $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ для моделирования процессов миграции ^{137}Cs в системе почва-растение [9]. Исследования проводились на серии участков в Японии, Центральной и Восточной Европы.

Существующие исследования поведения стабильных элементов и сравнения их соотношений с изотопами-аналогами в растительных образцах показывают положительную корреляцию между концентрациями ^{137}Cs и ^{133}Cs , подтверждая гипотезу о том, что ^{137}Cs поступает в растения подобно стабильному аналогу. Тем не менее, вопрос равновесных концентраций ^{137}Cs и ^{133}Cs в образцах лишайников и мхов

рассматривался лишь фрагментарно, а факторы миграции не обсуждались подробно и не являлись предметом специальных исследований в Республике Беларусь.

Цель исследования: оценить аккумулярующую способность лишайников и мхов в отношении ^{137}Cs и ^{133}Cs и исследовать изотопные отношения $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ в профиле лесных почв, лишайников различных экологических групп и мхов.

Материалы и методы исследования

Объектом исследований являлась лесная экосистема на загрязненной радионуклидами территории ПГРЭС. Опытный объект расположен в «ближней» зоне радиоактивного загрязнения, 30 км вокруг ЧАЭС, вблизи бывшего населенного пункта (далее – б. н. п.) Радин. Постоянная пробная площадь выбиралась с учетом плотности радиоактивного загрязнения территории, типа леса и возраста насаждений. В качестве пробной площади был выбран наиболее распространенный в районах аварийных выбросов ЧАЭС сосняк мшистый. Некоторые лесотаксационные характеристики пробной площади: сосняк мшистый, состав 10С, средневозрастной, запас ^{137}Cs – $2599,6 \pm 364,5$ кБк/м². Среднее значение мощности экспозиционной дозы гамма-излучения на поверхности почвы – $3,2 \pm 0,3$ мкЗв/ч, на высоте 1 м – $3,8 \pm 0,4$ мкЗв/ч.

На каждой контрольной точке проводили отбор образцов почвы, эпифитных и эпигейных лишайников, напочвенных мхов, коры и древесины сосны.

Отбор почвенных образцов проводился без живого напочвенного покрова и лесной подстилки цилиндрическим буром (модифицированный бур Малькова) диаметром 4 см. На каждой контрольной точке было сделано по 3 укола на глубину 20 см. Керн почвы разделялся специальным шпателем на слои по 5 см высотой. Одинаковые по глубине слои смешивались и готовились объединенные пробы почвы.

Образцы эпифитных лишайников отбирались со стволов взрослых прямостоящих сосен с максимальным проективным покрытием лишайника на высоте 1–2 м от поверхности земли, чтобы по возможности не допустить загрязнения частицами почвы [21]. При этом стремились отобрать образцы без субстрата, примерно одного размера и, соответственно, сходного возраста. Эпигейные лишайники и мхи отбирали руками или ножом вместе с тонким слоем почвы на участке размером 25 x 25 см.

Собранные виды лишайников и мхов были исследованы и идентифицированы как *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Cladonia rangiferina* (L.) Weber ex F. H. Wigg, *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt и *Dicranum polysetum* Sw. Можно справедливо полагать, что на территории ПГРЭС произрастает большее число видов, однако отбирались наиболее распространенные, обильно представленные и узнаваемые виды.

Образцы верхнего слоя коры отбирались с высоты 1–2 м на глубину 0,5 см при помощи ножа или скобеля. Отбор образцов древесины (кернов) проводили возрастным буром «Haglof» (Швеция) в местах отбора коры.

На пробной площади было установлено 4 штатива с горизонтальными планшетами. Планшетом служила деревянная рамка размером 0,9 x 0,9 м, на которую натягивалось фильтровальное полотно Петрянова (ФПП 15–1,5). Ткань Петрянова полностью удерживает осажденный материал и представляет собой липкую поверхность с немного большей шероховатостью, чем поверхность воды, что рекомендуется для мониторинга радиоактивных выпадений [22]. Полотно закреплялось сбоку рамы. На подготовленный планшет накладывалась отбеленная медицинская марля. Штатив устанавливался на высоте 1 м от поверхности земли. Первая установка планшетов проводилась с конца июля по начало августа. Время экспозиции планшетов – 28 суток. Вторая – с августа по октябрь. Время экспозиции – 55 суток.

Подготовка натуральных образцов к измерениям включала в себя предварительное высушивание проб, очищение их от посторонних включений, измельчение, приготовление навески в соответствии с измерительной геометрией, размещение навески в кювете.

Для определения содержания изотопов Cs в обменной форме образцы почвы массой 20 г помещались в 200 мл 1 М раствора ацетата аммония с рН, доведенной до 7,0. Требуемое значение рН получали прибавлением раствора аммиака или раствора уксусной кислоты с массовой долей 10 %. Суспензия взбалтывалась при комнатной температуре на протяжении 24 ч. Экстракт отделялся от почвы фильтрованием. Жидкая фаза объемом 100 мл помещалась в сосуд для измерения на гамма-спектрометре. 100 мкл жидкой фазы разводилось в 12 мл 1 % HNO_3 для измерения содержания элементов на масс-спектрометре.

Измерение удельной активности ^{137}Cs в образцах проводили в соответствии с принятыми методическими рекомендациями с использованием гамма-спектрометрического комплекса *Canberra* на основе полупроводникового гамма-детектора GX2018. Энергетическое разрешение детектора составляло 1,85 кэВ для линии ^{60}Co при 1,33 МэВ. Эффективность регистрации спектра для энергии 1,33 МэВ составила 23,5 %. Погрешность измерения составляла от 7 до 10 % в зависимости от активности образца. Для характеристики уровня радиоактивности образцов использовали величину удельной активности (кБк/кг) в расчете на сухую массу.

Определение ^{133}Cs проводилось с помощью квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ICP Q MS) Elan DRC-e, производства Perkin Elmer (США). Измерения содержания ^{133}Cs в каждой пробе проводилось в пятикратной повторности. Для характеристики уровня содержания элемента в образце использовали величину концентрации, выраженную в мг/кг.

Полученные результаты были обработаны методами описательной статистики, а также однофакторного дисперсионного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведен сбор и оценка выпадений ^{137}Cs в сосновом лесу. Результаты представлены в табл. 1. Общая среднесуточная активность выпадений ^{137}Cs в результате первого эксперимента (июль-август, 28 дней) на пробной площадке составила $19,14 \pm 5,64$ Бк/м²*сут, в результате второго эксперимента (август-октябрь, 55 дней) – $16,74 \pm 4,76$ Бк/м²*сут.

Таблица 1

Среднесуточная активность выпадений ^{137}Cs на горизонтальные планшеты

Table 1

Average daily activity of ^{137}Cs deposition on horizontal plates

Параметр	Активность ^{137}Cs , Бк/м ² *сут	
	1-й эксперимент (28 дней)	2-й эксперимент (55 дней)
Атмосферные выпадения		
min	5,4	2,2
max	13,0	8,4
mean ± SE	9,2 ± 2,1	5,7 ± 1,5
Растительный опад (иглица + кора)		
min	2,0	4,7
max	17,0	17,0
mean ± SE	9,9 ± 3,5	11,0 ± 3,3

Примечание. min – минимальное значение, max – максимальное значение, mean ± SE – среднее значение ± стандартная ошибка среднего.

Среднесуточная активность выпадений ^{137}Cs в составе растительного опада в лесных экосистемах выше в сравнении с атмосферными выпадениями радионуклида на горизонтальную поверхность как в первом эксперименте, так и во втором.

В осенний сезон было отмечено снижение среднесуточных значений активности ^{137}Cs в пробах радиоактивных выпадений из атмосферы. При этом наблюдается увеличение среднесуточной активности ^{137}Cs в растительном опаде (иглица + кора). Анализ распределения выпадений ^{137}Cs показал, что более половины общей активности радионуклида приходится на долю древесного опада (51,2 % в первом эксперименте и 65,9 % во втором).

Средняя удельная активность ^{137}Cs древесного опада за период июль-август составила $11,7 \pm 0,8$ кБк/кг, за август – октябрь – $8,3 \pm 1,6$ кБк/кг. При этом среднесуточные значения массы древесного опада составили $0,8 \pm 0,3$ г/м²*сут во время первого эксперимента и $1,3 \pm 0,2$ г/м²*сут во время второго.

Проведено сравнение вертикального распределения ^{137}Cs и ^{133}Cs в лесной почве. В собранных образцах была измерена удельная активность ^{137}Cs (рис. 1а), а также обменная форма ^{137}Cs и ^{133}Cs (рис. 1б, 1в). Удельная активность ^{137}Cs в почвенном профиле снижается с глубиной. Максимальное загрязнение данным радионуклидом в почвах характерно для верхнего слоя (0–5 см) и составляет $28,4 \pm 6,3$ кБк/кг. Анализ валового запаса ^{137}Cs в почве показал, что в верхнем слое содержится 72 % изотопа.

Содержание обменной формы ^{137}Cs в почвенном профиле имеет неравномерное распределение. Имеется тенденция к увеличению содержания обменной формы ^{137}Cs вниз по профилю. Верхние слои почвы, в отличие от общего содержания ^{137}Cs , характеризуются меньшими значениями удельной активности обменной формы радионуклида. При этом наблюдается увеличение доли обменной формы радионуклида вниз по почвенному профилю. В данной форме в почве находится от 0,8 до 17,7 % от общего содержания ^{137}Cs .

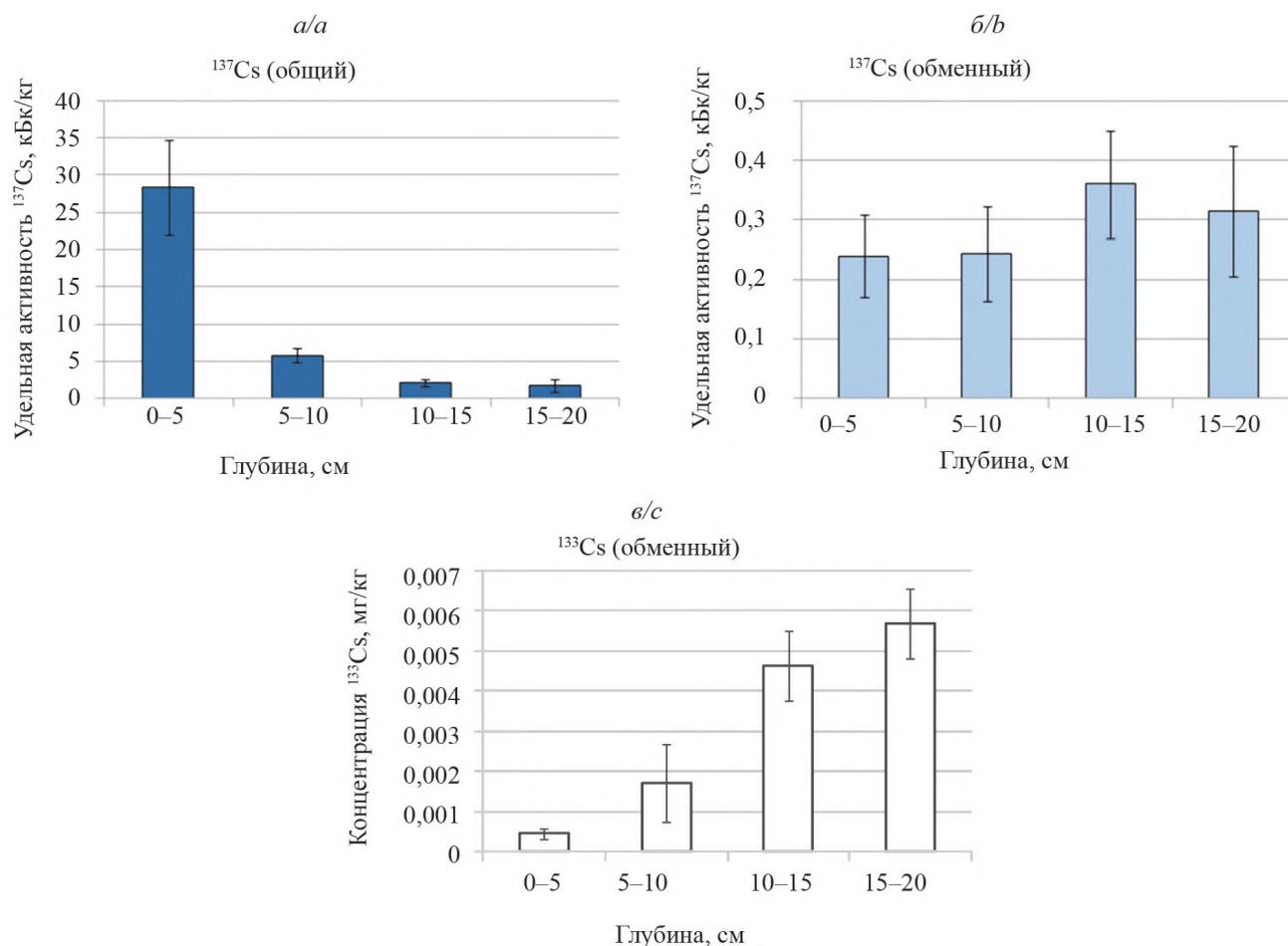


Рис. 1. Вертикальное распределение удельной активности ^{137}Cs (а) и обменной формы ^{137}Cs (б) и ^{133}Cs (в) в почве соснового леса

Fig. 1. Vertical distribution of the specific activity of ^{137}Cs (a) and the exchange form of ^{137}Cs (b) and ^{133}Cs (c) in the soil of a pine forest

Концентрация обменной формы ^{133}Cs в минеральных слоях почвы варьирует от 0,0002 до 0,007 мг/кг. В отличие от послойного распределения ^{137}Cs , концентрация ^{133}Cs с глубиной почвенного профиля возрастает, что связано с высокой степенью подвижности данной формы изотопа. Кроме того, в нижних слоях почвы ^{133}Cs может заключаться в частицах коренных пород, в отличие от антропогенного Cs.

Такая тенденция увеличения концентрации ^{133}Cs с глубиной отмечена для почв японских лесов [23]. Максимальная средняя концентрация обменной формы ^{133}Cs в нижних слоях почвы (10–15 и 15–20 см) сходна и составляет $0,005 \pm 0,0009$ и $0,006 \pm 0,0009$ мг/кг соответственно. Напротив, в верхнем 0–5 см слое почвы концентрация ^{133}Cs минимальная и составляет $0,0005 \pm 0,0001$ мг/кг.

Почвенные профили для обменной формы ^{137}Cs и ^{133}Cs различаются, что приводит к уменьшению соотношения $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ с глубиной от слоя 0–5 см к слою почвы 15–20 см и свидетельствует о неравновесном соотношении этих изотопов ($729,6 \pm 314,8$ кБк/мг для 0–5 см слоя почвы, $303,3 \pm 76,4$ кБк/мг для 5–10 см, $77,9 \pm 12,2$ кБк/мг для 10–15 слоя и $52,3 \pm 15,5$ кБк/мг для 15–20 слоя).

Отношения обменной формы $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ в 0–5 слое почвы были более чем на 76 % выше, чем отношения, наблюдаемые в нижеследующих слоях. Исключение составила лишь одна точка отбора, где соотношение $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ в 5–10 см слое было почти в 3 раза больше, чем в 0–5 см слое. Для 5–10 см слоя почвы между содержанием ^{137}Cs и ^{133}Cs наблюдается хорошая корреляционная взаимосвязь ($r = 0,91$, $n = 10$).

На рис. 2 представлено отношение между измеренными концентрациями ^{137}Cs и ^{133}Cs обменной формы в почве.

Поскольку удельная активность обменной формы ^{137}Cs не сильно меняется с глубиной, изменение соотношений $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ в почве в основном обусловлено концентрацией ^{133}Cs , которая возрастает с глубиной. В исследовании [10] показано, что изменение соотношений $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ было обусловлено концентрацией ^{137}Cs , которая уменьшалась с глубиной. Данные расхождения, вероятно, обусловлены различием принятых к исследованию форм ^{137}Cs в почве. Полученные результаты свидетельствуют о том, что антропогенный ^{137}Cs , выпавший в результате аварии на Чернобыльской АЭС, не достиг равновесия с природным ^{133}Cs

в минеральных почвенных горизонтах на момент отбора проб. Таким образом, соотношение $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ в минеральных слоях почвы требует больше времени, чтобы оставаться постоянным.

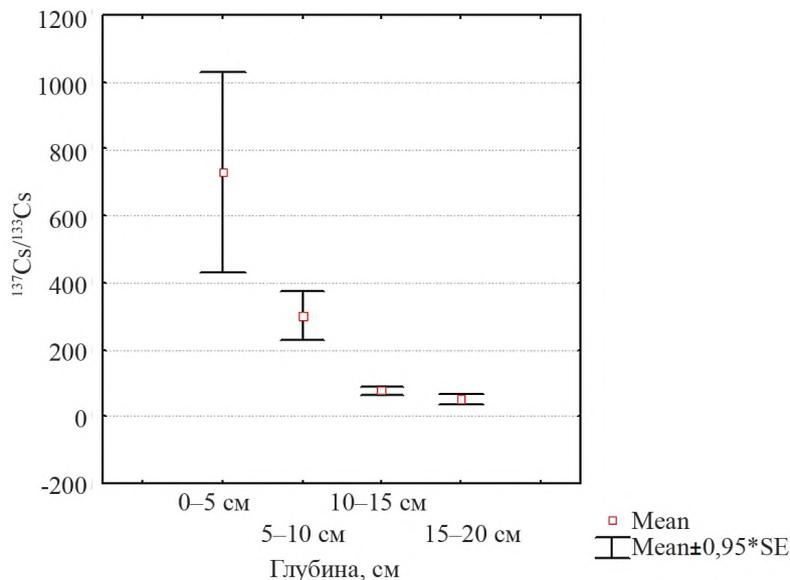


Рис. 2. Вертикальное распределение соотношений $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ в почве

Fig. 2. Vertical distribution of $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ ratios in soil

Уровни содержания ^{137}Cs и ^{133}Cs в лишайниках, мхах, коре и древесине различались в зависимости от вида образца (табл. 2). Самая высокая активность ^{137}Cs отмечена для лишайников и мхов. Наибольшее значение содержания ^{137}Cs было обнаружено у вида *Hypogymnia physodes*.

Таблица 2

Содержание ^{137}Cs и ^{133}Cs в растительных образцах

Table 2

Content of ^{137}Cs and ^{133}Cs in plant samples

Вид образца	Удельная активность ^{137}Cs , кБк/кг	Концентрация ^{133}Cs , мг/кг	Отношение $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$, кБк/мг
Лишайник <i>Hypogymnia physodes</i>	139,7±34,2	0,29±0,03	464,3
Лишайник <i>Cladonia rangiferina</i>	91,6±36,4	0,18±0,03	496,1
Мох <i>Pleurozium schreberi</i>	97,1±10,7	0,41±0,02	228,1
Мох <i>Dicranum polysetum</i>	117,7±16,2	0,48±0,04	208,2
Кора	15,7±2,9	0,037±0,006	446,3
Древесина	9,0±2,1	0,016±0,003	624,7

Аккумуляция ^{137}Cs в лишайниках и мхах не зависела от запасов данного радионуклида в почве и мощности дозы в воздухе. Какая-либо видовая специфичность накопления ^{137}Cs в лишайниках и мхах, произрастающих на исследуемой территории, в нашем исследовании также не была отмечена.

Самая высокая средняя концентрация ^{133}Cs в биомассе лишайников была отмечена для вида *Hypogymnia physodes*, мхов – для *Dicranum polysetum*. В условиях совместного произрастания мхи характеризуется более высокой концентрацией ^{133}Cs в сравнении с лишайниками ($n = 57$, $p < 0,05$). Это может быть связано с тем, что основное количество радиоактивных веществ лишайники поглощают из аэральные выпадений, а другие источники радиоактивного загрязнения имеют меньшее значение, в то время как именно почва является основным депо ^{133}Cs . Полученные данные соответствует проведенному анализу единичных особей лишайников и мхов, собранных в сосновых лесах на территории ПГРЭЗ Йошидой и Мураматсу в 1998 г. [10], где концентрация ^{133}Cs в лишайнике составила $0,239 \pm 0,0045$ мг/кг, а во мхах разных территорий – $0,166 \pm 0,0008$ и $0,339 \pm 0,0027$ мг/кг.

Содержание ^{137}Cs и ^{133}Cs в образцах сосны различалось в зависимости от отобранных частей дерева. Наибольшие значения концентрации изотопов Cs наблюдались в коре, в древесине эти показатели были меньше.

С течением времени под влиянием биологических процессов в лесу ^{137}Cs постепенно мигрирует и приходит в равновесие со ^{133}Cs . Анализ поведения ^{133}Cs и сравнение его соотношения с ^{137}Cs может дать информацию о долгосрочном поведении радионуклида, на основании которой можно прогнозировать динамику уровней радиоактивного загрязнения растительных образцов.

На рис. 3 представлена взаимосвязь между содержанием ^{137}Cs и ^{133}Cs в лишайниках, мхах, коре и древесине. Каждая точка представляет собой один из собранных образцов.

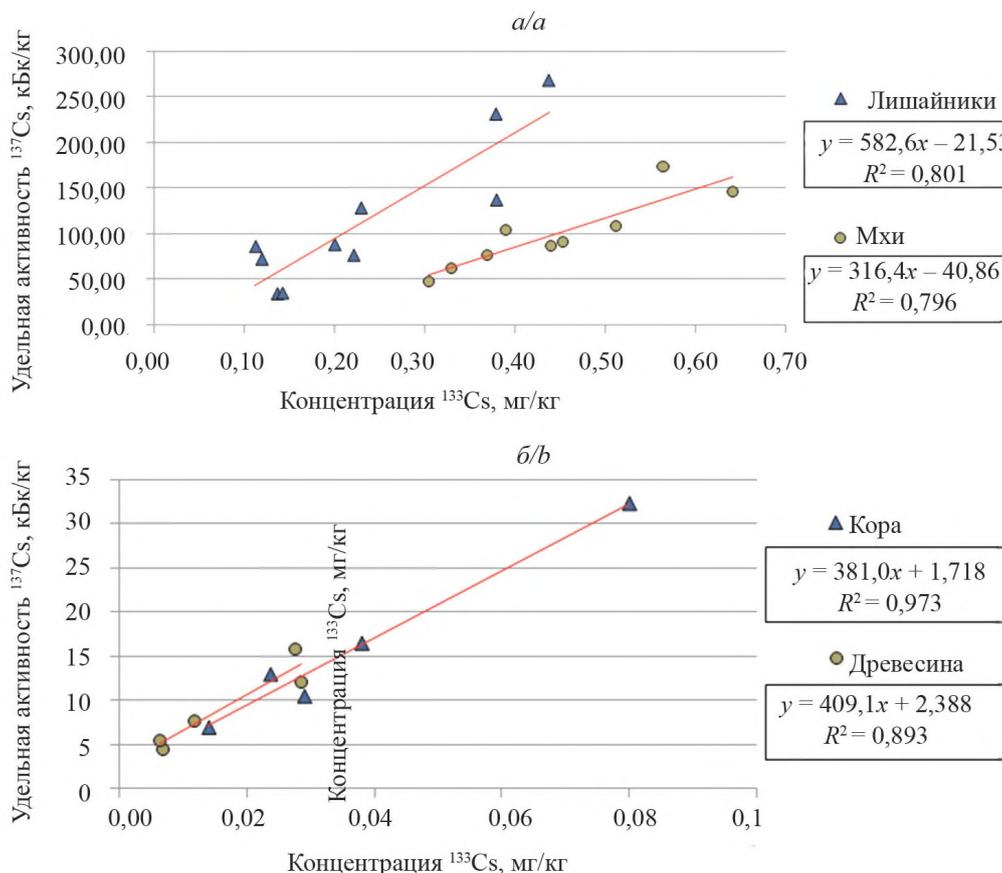


Рис. 3. Отношения между ^{137}Cs и ^{133}Cs в лишайниках и мхах (а) и коре и древесине (б)

Fig. 3. The relationship between ^{137}Cs and ^{133}Cs in lichens and mosses (a) and bark and wood (b)

Для каждого вида растительного образца соотношения $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ были довольно постоянными в пределах пробной площади и составляли $480,2 \pm 56,0$ kBq/mg для лишайников, $219,2 \pm 14,9$ kBq/mg для мхов, $446,3 \pm 32,7$ kBq/mg для коры и $624,7 \pm 67,8$ kBq/mg для древесины. Средние соотношения, обнаруженные у эпифитного лишайника *Hypogymnia physodes* и эпигейного *Cladonia rangiferina* близки к соотношениям $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ в 0–10 см почвенном горизонте ($484,5 \pm 189,5$ kBq/mg) и соответствующим образцам коры. Соотношения $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ в 0–15 см слое почвы ($127,3 \pm 18,8$ kBq/mg) близки к наблюдаемым значениям в образцах мхов, отобранных на соответствующих точках. Кроме того, соотношения $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ в 0–5 см почвенном горизонте ($729,6 \pm 314,8$ kBq/mg) близки к наблюдаемым значениям в древесине.

Между содержанием ^{137}Cs и ^{133}Cs в растительной биомассе наблюдается хорошая корреляционная взаимосвязь. Коэффициенты корреляции составили: $r = 0,90$ для лишайников, $r = 0,89$ для мхов, $r = 0,99$ для коры и $r = 0,95$ для древесины. Этот результат предполагает вывод, что данные растения поглощают ^{137}Cs аналогично ^{133}Cs . Таким образом, соотношение $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ может быть полезным критерием для оценки равновесия осажденных ^{137}Cs и ^{133}Cs в лесной экосистеме.

Заключение

Результаты исследования показывают, что среднесуточная активность выпадений ^{137}Cs в составе растительного опада выше в сравнении с атмосферными выпадениями радионуклида на горизонтальную

поверхность. В осенний сезон отмечается снижение среднесуточных значений активности ^{137}Cs в пробах радиоактивных выпадений и увеличение в растительном опаде. При этом более половины общей активности радионуклида приходится на долю растительного опада.

Удельная активность ^{137}Cs в почвенном профиле снижается с глубиной. Максимальное загрязнение данным радионуклидом в почвах характерно для 0–5 см слоя. Содержание обменной формы ^{137}Cs в почвенном профиле имеет неравномерное распределение, верхние слои почвы, в отличие от общего распределения ^{137}Cs , характеризуются меньшими значениями удельной активности обменной формы ^{137}Cs . Концентрация ^{133}Cs , в отличие от вертикального распределения ^{137}Cs , с глубиной почвенного профиля возрастает. Распределение обменных форм ^{137}Cs и ^{133}Cs по профилю почвы различается, что приводит к уменьшению соотношения $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ с глубиной от горизонта 0–5 см к горизонту 15–20 см и свидетельствует о неравновесном соотношении этих изотопов.

Уровни содержания ^{137}Cs и ^{133}Cs в лишайниках, мхах, коре и древесине различаются в зависимости от вида образца. В целом удельная активность ^{137}Cs в биомассе лишайников и мхов значительно превосходит данный показатель в коре и древесине. Наибольшее значение содержания ^{137}Cs отмечено у вида *Hypogymnia physodes*. Самая высокая средняя концентрация ^{133}Cs в биомассе лишайников была отмечена для вида *Hypogymnia physodes*, мхов – для *Dicranum polysetum*. В условиях совместного с лишайниками произрастания мхи характеризуется более высокой концентрацией ^{133}Cs .

Для каждого вида растительного образца между содержанием ^{137}Cs и ^{133}Cs наблюдается хорошая корреляционная взаимосвязь, что свидетельствует о схожих миграционных потоках элементов.

Библиографические ссылки

1. Ипатьев ВА, Багинский ВФ, Булавик ИМ и др. *Лес. Человек. Чернобыль*. В: *Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации*. Гомель: Институт леса НАН Беларуси; 1999. 451 с.
2. Конопля ЕФ, Ролевич ИВ, редакторы. *Последствия чернобыльской катастрофы в Республике Беларусь. Национальный доклад*. Минск: Министерство по чрезвычайным ситуациям и защите населения от последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Республики Беларусь; 1996. 96 с.
3. Ипатьев ВА, Булавик ИМ, Булко НИ и др. Лес и Чернобыль. В: *Проблемы лесоведения и лесоводства: сборник научных трудов Института леса НАН Беларуси*. 1993;37(1):34–43.
4. Ипатьев ВА, Булко НИ, Митин НВ и др. *Радиоэкологический феномен лесных экосистем*. Гомель: Институт леса НАН Беларуси; 2004. 310 с.
5. Щеглов АИ, Цветнова ОБ. Роль лесных экосистем при радиоактивном загрязнении. *Природа*. 2001;4:22–32.
6. Дворник АМ, Дворник АА. Радиоизотопы и их стабильные аналоги в лесных экосистемах. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. 2008;5(50):14–19.
7. Липатов ДН, Щеглов АИ, Манахов ДВ и др. Пространственное распределение чернобыльского ^{137}Cs , стабильного ^{133}Cs и тяжелых металлов в подстилке ельника. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2018;58(6):653–663. DOI:10.1134/S0869803118060085.
8. Павлоцкая ФИ. *Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах*. Москва: Атомиздат; 1974. 216 с.
9. Yoshida S, Muramatsu Y, Dvornik AM, et al. Equilibrium of radiocesium with stable cesium within the biological cycle of contaminated forest ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2004;75(3):301–313. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2003.12.008.
10. Rühm W, Yoshida S, Muramatsu Y, et al. Distribution patterns for stable ^{133}Cs and their implications with respect to the long-term fate of radioactive ^{134}Cs and ^{137}Cs in a semi-natural ecosystem. *Journal of Environmental Radioactivity*. 1999;45:253–270. DOI: 10.1016/S0265-931X(98)00104-0.
11. Chao JH, Chiu CY, Lee HP. Distribution and uptake of ^{137}Cs in relation to alkali metals in a perhumid montane forest ecosystem. *Applied Radiation and Isotopes*. 2008;66(10):1287–1294. DOI: 10.1016/j.apradiso.2008.02.087.
12. Vinichuk M. Accumulation of potassium, rubidium and caesium (^{133}Cs and ^{137}Cs) in various fractions of soil and fungi in a Swedish forest. *Science of The Total Environment*. 2010;408(12):2543–2548. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.02.024.
13. Yoshida S, Muramatsu Y. Concentrations of alkali and alkaline earth elements in mushrooms and plants collected in a Japanese pine forest, and their relationship with ^{137}Cs . *Journal of Environmental Radioactivity*. 1998;41(2):183–205. DOI: 10.1016/S0265-931X(97)00098-2.
14. Yoshida S, Muramatsu Y, Steiner M, et al. Stable elements – as a key to predict radionuclide transport in forest ecosystems. *Radioprotection*. 2002;37:391–396. DOI: 10.1051/radiopro/2002073.
15. Rühm W, Kammerer L, Hiersche L, et al. The $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ ratio in fungi as an indicator of the major mycelium location in forest soil. *Journal of Environmental Radioactivity*. 1997;35(2):129–148. DOI: 10.1016/S0265-931X(96)00051-3.
16. Ramzaev V, Barkovsky A, Gromov A, et al. Epiphytic fruticose lichens as biomonitors for retrospective evaluation of the $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ ratio in Fukushima fallout. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014;138:177–185. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.09.001.
17. Nimis PL. Radiocesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobotanica*. 1996;15:3–49.
18. Бязров ЛГ. *Лишайники – индикаторы радиоактивного загрязнения*. Москва: Издательство КМК; 2005. 476 с.
19. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Gromov AV. Temporal variations of ^7Be , ^{40}K , ^{134}Cs and ^{137}Cs in epiphytic lichens (genus *Usnea*) at the Sakhalin and Kunashir islands after the Fukushima accident. *Radiation Hygiene*. 2016;9(3):14–27. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-3-14-27.
20. Conti ME, Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review. *Environmental Pollution*. 2001;114(3):471–492. DOI: 10.1016/j.polar.2020.100536.
21. Santitoro A, Aprile GG, Baldantoni D, et al. Trace element analyses an epiphytic lichen and its bark substrate to assess suitability for air biomonitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2004;98:59–67. DOI: 10.1023/b:emas.0000038179.24535.9c.

22. Rosner G, Winkler R. Nuclide-dependent local and collector surface effects in sampling of radioactive deposition to ground. *Applied Radiation and Isotopes*. 2001;55(6):823–829. DOI: 10.1016/s0969-8043(01)00132-4.
23. Yoshida S, Muramatsu Y. Determination of major and trace elements in mushroom, plant and soil samples collected from Japanese forests. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 1997;67(1-4):49–58. DOI: 10.1080/03067319708031393.

References

1. Ipatiev VA, Baginsky VF, Bulavik IM, et al. *Les. Chelovek. Chernobyl'. V: Lesnye ekosistemy posle avarii na Chernobyl'skoi AES: sostoyaniye, prognoz, reaktivnaya naseleniya, puti reabilitatsii* [Forest. Human. Chernobyl. In: Forest ecosystems after the accident at the Chernobyl NPP: condition, prediction, response of the population, ways of rehabilitation]. Gomel: Forest Institute of the NAS of Belarus; 1999. 451 p. Russian.
2. Konoplya EF, Rolevich IV, editors. *Posledstviya chernobyl'skoi katastrofy v Respublike Belarus'. Natsional'nyi doklad* [Consequences of the Chernobyl disaster in the Republic of Belarus. National report]. Minsk: The Ministry for Emergency Situations and Protection of Population from the Consequences of the Chernobyl Catastrophe of the Republic of Belarus; 1996. 96 p. Russian.
3. Ipatiev VA, Bulavik IM, Bulko NI, et al. *Les i Chernobyl'. Problemy lesovedeniya i lesovodstva: sbornik nauchnykh trudov Instituta lesa NAN Belarusi* [Forest and Chernobyl. In: Problems of forestry and forest management: collection of scientific papers of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus]. 1993;37(1):34–43. Russian.
4. Ipatiev VA, Bulko NI, Mitin NV, et al. *Radioekologicheskii fenomen lesnykh ekosistem* [Radioecological phenomenon of forest ecosystems]. Gomel: Forest Institute of the NAS of Belarus; 2004. 310 p. Russian.
5. Shcheglov AI, Tsvetnova OB. *Rol' lesnykh ekosistem pri radioaktivnom zagryaznenii* [The role of forest ecosystems in radioactive contamination]. *Nature*. 2001;4:22–32. Russian.
6. Dvornik AM, Dvornik AA. *Radioizotopy i ikh stabil'nye analogi v lesnykh ekosistemakh* [Radioisotopes and their stable analogues in forest ecosystems]. *Bulletin of the F. Skorina Gomel State University*. 2008;5(50):14–19. Russian.
7. Lipatov DN, Shcheglov AI, Monakhov DV, et al. *Prostranstvennoe raspredelenie chernobyl'skogo ¹³⁷Cs, stabil'nogo ¹³³Cs i tyazhelykh metallov v podstilke elnika* [Spatial distribution of Chernobyl ¹³⁷Cs, stable ¹³³Cs and heavy metals in spruce forest litter]. *Radiation Biology. Radioecology*. 2018;58(6):653–663. DOI:10.1134/S0869803118060085. Russian.
8. Pavlotskaya FI. *Migratsiya radioaktivnykh produktov global'nykh vypadenii v pochvakh* [Migration of radioactive products of global precipitation in soils]. Moscow: Atomizdat; 1974. 216 p. Russian.
9. Yoshida S, Muramatsu Y, Dvornik AM, et al. Equilibrium of radiocesium with stable cesium within the biological cycle of contaminated forest ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2004;75(3):301–313. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2003.12.008.
10. Rühm W, Yoshida S, Muramatsu Y, et al. Distribution patterns for stable ¹³³Cs and their implications with respect to the long-term fate of radioactive ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in a semi-natural ecosystem. *Journal of Environmental Radioactivity*. 1999;45:253–270. DOI: 10.1016/S0265-931X(98)00104-0.
11. Chao JH, Chiu CY, Lee HP. Distribution and uptake of ¹³⁷Cs in relation to alkali metals in a perhumid montane forest ecosystem. *Applied Radiation and Isotopes*. 2008;66(10):1287–1294. DOI: 10.1016/j.apradiso.2008.02.087.
12. Vinichuk M. Accumulation of potassium, rubidium and caesium (¹³³Cs and ¹³⁷Cs) in various fractions of soil and fungi in a Swedish forest. *Science of The Total Environment*. 2010;408(12):2543–2548. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.02.024.
13. Yoshida S, Muramatsu Y. Concentrations of alkali and alkaline earth elements in mushrooms and plants collected in a Japanese pine forest, and their relationship with ¹³⁷Cs. *Journal of Environmental Radioactivity*. 1998;41(2):183–205. DOI: 10.1016/S0265-931X(97)00098-2.
14. Yoshida S, Muramatsu Y, Steiner M, et al. Stable elements – as a key to predict radionuclide transport in forest ecosystems. *Radioprotection*. 2002;37:391–396. DOI: 10.1051/radiopro/2002073.
15. Rühm W, Kammerer L, Hiersche L, et al. The ¹³⁷Cs/¹³⁴Cs ratio in fungi as an indicator of the major mycelium location in forest soil. *Journal of Environmental Radioactivity*. 1997;35(2):129–148. DOI: 10.1016/S0265-931X(96)00051-3.
16. Ramzaev V, Barkovsky A, Gromov A, et al. Epiphytic fruticose lichens as biomonitors for retrospective evaluation of the ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs ratio in Fukushima fallout. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014;138:177–185. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.09.001.
17. Nimis PL. Radiocesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobotanica*. 1996;15:3–49.
18. Byazrov LG. *Lishainiki – indikatory radioaktivnogo zagryazneniya* [Lichens – indicators of radioactive contamination]. Moscow: KMK Scientific Press Ltd.; 2005. 476 p.
19. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Gromov AV. Temporal variations of ⁷Be, ⁴⁰K, ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in epiphytic lichens (genus *Usnea*) at the Sakhalin and Kunashir islands after the Fukushima accident. *Radiation Hygiene*. 2016;9(3):14–27. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-3-14-27.
20. Conti ME, Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review. *Environmental Pollution*. 2001;114(3):471–492. DOI: 10.1016/j.polar.2020.100536.
21. Santitiro A, Aprile GG, Baldantoni D, et al. Trace element analyses an epiphytic lichen and its bark substrate to assess suitability for air biomonitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2004;98:59–67. DOI: 10.1023/b:emas.0000038179.24535.9c.
22. Rosner G, Winkler R. Nuclide-dependent local and collector surface effects in sampling of radioactive deposition to ground. *Applied Radiation and Isotopes*. 2001;55(6):823–829. DOI: 10.1016/s0969-8043(01)00132-4.
23. Yoshida S, Muramatsu Y. Determination of major and trace elements in mushroom, plant and soil samples collected from Japanese forests. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 1997;67(1-4):49–58. DOI: 10.1080/03067319708031393.

Статья поступила в редакцию 29.11.2022.
Received by editorial board 29.11.2022.

УДК 574:539.1.04

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ДЛЯ ДЕЗАКТИВАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ ТЕРРИТОРИЙ

О. И. РОДЬКИН¹⁾, Н. Н. ЦЫБУЛЬКО¹⁾

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

Загрязнение почв радионуклидами, основной причиной которого является авария на Чернобыльской атомной станции, является одним из наиболее опасных негативных факторов воздействия на окружающую среду. Эффективный метод для дезактивации загрязненных радионуклидами территорий – фиторемедиация, одним из направлений которой является выращивание «энергетических» культур. Преимущество такого подхода – возможность использования биомассы как возобновляемого источника зеленой энергии в сочетании с постепенной рекультивацией загрязненных почв. Перспективной для целей фиторемедиации культурой является ива, быстрорастущие виды которой обеспечивают высокий урожай биомассы с производственной плантации. Проблемный вопрос – безопасное использование полученной биомассы. Оценка условий перехода радиоактивного цезия в биомассу ивы проводилась на загрязненных после аварии на ЧАЭС территориях Беларуси. Эксперименты свидетельствуют, что прогнозируемое содержание ¹³⁷Cs в древесине быстрорастущей ивы значительно ниже уровня по нормативам допустимого для древесного топлива, установленным для Республики Беларусь (740 Бк/кг). При уровне загрязнения почв, при котором они выводятся из сельскохозяйственного использования (40 Ки/км²), прогнозируемое содержание ¹³⁷Cs в древесине составит от 35 до 120 Бк/кг (в зависимости от дозы внесения калийных удобрений).

Ключевые слова: фиторемедиация; радионуклиды; энергетические культуры; биотопливо.

PROSPECTS FOR USING THE PHYTOREMEDIATION METHOD FOR DEACTIVATION OF TERRITORIES CONTAMINATED WITH RADIONUCLIDES

A. I. RODZKIN^a, N. N. TSHYBULKO^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daihabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: A. I. Rodzkin (aleh.rodzkin@rambler.ru)

Soil contamination with radionuclides, the main cause of which is the accident at the Chernobyl nuclear power plant, is one of the most dangerous negative environment impact factors. Phytoremediation including cultivation of «energy» crops is an effective method for decontamination of territories contaminated with radionuclides. The advantage of this approach

Образец цитирования:

Родькин ОИ, Цыбулько НН. Перспективы использования метода фиторемедиации для дезактивации загрязненных радионуклидами территорий. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;1:42–50.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-42-50>

For citation:

Rodzkin AI, Tshybulko NN. Prospects for using the phytoremediation method for deactivation of territories contaminated with radionuclides. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;1:42–50. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-42-50>

Авторы:

Олег Иванович Родькин – доктор биологических наук, доцент; заместитель директора по учебной работе.
Николай Николаевич Цыбулько – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; начальник научно-исследовательского сектора.

Authors:

Aleh I. Rodzkin, doctor of science (biology), docent; deputy director for educational work.
aleh.rodzkin@rambler.ru
Mikalai M. Tsybulka, doctor of science (agriculture); full professor; head of the research center.
nik.nik1966@tut.by

is the possibility of using biomass as a renewable source of green energy in combination with the gradual reclamation of polluted soils. A promising crop for the purposes of phytoremediation is willow, the fast-growing species of which provide a high yield of biomass from a production plantation. A problematic issue is the safe use of willow biomass. The assessment of the conditions for the transition of radioactive cesium into willow biomass was carried out on the territories of Belarus contaminated after the Chernobyl accident. Experiments have shown that the predicted content of ^{137}Cs in the wood of a fast-growing willow is significantly lower than the level allowed for wood fuel according to the standards established for the Republic of Belarus (740 Bq/kg). Even at the level of soil pollution at which they are removed from agricultural use (40 Ci/km²), the content of ^{137}Cs in wood will be from 35 to 120 Bq/kg (depending on the dose of potash fertilizers).

Keywords: phytoremediation; radionuclides; energy crops; biofuels.

Введение

Загрязнение радионуклидами является одним из наиболее опасных негативных факторов воздействия на почвенные и прилегающие к ним экосистемы. Можно выделить ряд основных причин радиоактивного загрязнения земель, которые вызваны антропогенным воздействием. Наиболее масштабное загрязнение в истории связано с аварией на Чернобыльской атомной станции 26 апреля 1986 г. [1]. Негативные последствия Чернобыльской аварии в той или иной степени наблюдались в десятках стран. Конечно, в наибольшей степени пострадали территории тех стран, которые расположены в непосредственной близости от Чернобыля. Это Украина, где непосредственно располагается атомная станция, Российская Федерация и Республика Беларусь, на территорию которой выпал наиболее значительный объем радионуклидов. В результате зона радиоактивного загрязнения охватывает 23 % территории страны, в том числе 1,0 млн га сельскохозяйственных и 1,6 млн га лесных земель [2; 3]. В Беларуси после аварии на Чернобыльской АЭС основная площадь загрязнения обусловлена выпадением радионуклидов со следующим периодом полураспада: цезий-137 – 30 лет и стронций-90 – 29 лет. Из сельскохозяйственного оборота выведены земли с плотностью загрязнения цезием-137 свыше 40 Ки/км², стронцием-90 свыше 3 Ки/км². Самоочищение почвы за счет перемещения и естественного распада радионуклидов происходит достаточно медленно¹. Ежегодное снижение их содержания в верхнем 5-сантиметровом слое почвы составляет примерно 5–10 %, а в нижележащих слоях 1–2 %.

Последствия катастрофы на ЧАЭС носят глобальный характер, результатом которой является радиоактивное загрязнение территорий не только Республики Беларусь и Украины, но и ряда других стран. Так, выпадение радиоактивных осадков, образовавшихся после взрыва на ЧАЭС, на территорию Сербии вызвали увеличение плотности загрязнения ^{137}Cs в ряде регионов страны более чем в 10 раз, с 15,5 до 236 Бк/кг⁻¹ [4].

Методы дезактивации загрязненных радионуклидами территорий можно разделить на следующие виды: механические, физические (безреагентный), физико-химические (с применением реагентов), электрокинетические и биологические [5]. Механические и химические способы дезактивации обладают серьезными недостатками: они снижают плодородие почв, либо ухудшают их физические и химические свойства [6]. С этой точки зрения, значительные перспективы имеют биологические методы дезактивации², к которым относится фиторемедиация [7].

Название метода происходит от греческого «фитон» (растение) и латинского «ремедиум» (восстанавливать). Он основан на том, что многие виды растений способны накапливать загрязнители в биомассе и в результате их содержание в тканях и органах растений может в десятки и даже сотни раз превышать содержание в окружающей среде (почве). Соответственно, состояние окружающей среды будет постепенно улучшаться, и способность почв к воспроизводству хозяйственно-полезной продукции восстанавливаться. Скорость восстановления будет тем выше, чем быстрее растение способно аккумулировать загрязнители. В настоящее время методы фиторемедиации можно использовать для восстановления почв загрязненных свинцом, кадмием, ртутью и другими тяжелыми металлами, мышьяком, органическими загрязнителями, радионуклидами и т. д. [8].

Принципиально важным фактором для фиторемедиации является возможность дальнейшего безопасного использования или утилизации биомассы. Так, одним из направлений является фитоэкстракция, которая предусматривает использование растений гипер-аккумуляторов, способных быстро и в высоких концентрациях накапливать загрязнители в биомассе [9]. В этой случае биомасса может не только утилизироваться или сжигаться, но и поступать на переработку с целью извлечения ценного сырья, например, меди, никеля и других металлов. Более того, зола, которая образуется при сжигании,

¹Агеец В. Ю. Система мер снижения поступления радионуклидов в урожай – основа реабилитации загрязненных территорий Беларуси: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук : 06.01: Акад. аграр. наук Респ. Беларусь, Ин-т почвоведения и агрохимии. Минск, 2001.

²Экопортал. Технология фиторемедиации [Электронный ресурс]. URL: <https://ecportal.su/public/industry/view/1175.html> (дата обращения: 15.01.2023).

может быть также использована как вторичное сырье. Такой подход требует применения высокотехнологичных методов для экстракции полезных элементов из биомассы с учетом экономической рентабельности, что является трудноосуществимым на практике. Так, в целях фиторемедиации используют растения с высокой сорбционной способностью, в том числе амарант и бобовые травы. Как показывают результаты экспериментов, посев таких культур позволяет ежегодно снижать содержание в почве тяжелых металлов или радиоактивных элементов (стронций, цезий, торий) [10; 11]. Но при этом биомасса просто утилизируется вследствие высокого уровня загрязнения.

Хороший потенциал в качестве растений гипер-аккумуляторов имеют растения семейства крестоцветных как дикорастущих, так и культурных видов [9]. В этом случае опять же остается вопрос эффективного использования загрязненной биомассы. Очевидно, что культурные овощные растения, например капуста, не могут применяться в качестве продуктов питания, если они выращены на загрязненной территории. Достаточно эффективным накопителем ^{137}Cs являются рапс и подсолнечник. Но дальнейшее использование полученного из их семян масла может быть для технических, но не пищевых целей. Также для продовольственных целей нельзя использовать бобы фасоли, выращенной на загрязненных радионуклидами территориях, хотя это растение также имеет потенциал по накоплению ^{137}Cs . В качестве растения аккумулятора потенциально можно рассматривать ряд видов злаковых трав, например, щирца колосистая. Но использование такой биомассы на кормовые цели увеличивает риск накопления радионуклида в животноводческой продукции. Те же проблемы возникают при выращивании на загрязненных землях однолетних кустарников, например, летнего кипариса [9]. Одним из вариантов использования растений-накопителей, особенно бобовых трав (клевер, люцерна) является запашка биомассы [10]. Такой подход позволяет улучшить плодородие почв³, но эффективность дезактивации земель снижается, так как часть загрязненной радионуклидами биомассы возвращается в агроэкосистему.

Таким образом, при оценке эффективности фиторемедиации надо учитывать ряд экологических и экономических факторов. Активная аккумуляция загрязнителя и высокий уровень его содержания в биомассе в сочетании с интенсивным ростом культуры обеспечит быстрые темпы дезактивации почв. Но если биомассу нельзя использовать, поскольку экологически целесообразная утилизация сопряжена с дополнительными экономическими затратами. В противном случае, например, при запашке биомассы ее захоронении на полигонах или сжигании речь идет только о перераспределении радионуклидов в экосистемах.

В связи с этим более целесообразным и широко используемым является второе направление фиторемедиации, сфокусированное на постепенной рекультивации почв и очистке их от металлоидов, нефтяных углеводородов, остатков пестицидов, радионуклидов и ряда промышленных побочных продуктов. Эти загрязнители сложно извлечь для дальнейшего использования в качестве вторичных материальных ресурсов. Возможность безопасного использования биомассы определяется целевым назначением продукции (продукты питания, корма, препараты) и уровнем содержания в ней радионуклидов. С этой точки зрения, относительно невысокая скорость аккумуляции радионуклидов в продукции позволяет менее интенсивно, но неуклонно дезактивировать почву и использовать выращенную биомассу. Одним из направлений, отвечающих таким требованиям, является выращивание «энергетических» культур, биомасса которых может быть использована как возобновляемый источник для производства зеленой энергии.

Термин энергетические культуры включает травы, деревья и кустарники, выращиваемые для энергетических нужд. Такие культуры характеризуются значительной биомассой и высокими темпами роста. Среди травянистых культур потенциал для фиторемедиации имеют как культурные виды (мискантус), так и тростник и другие виды естественной болотной растительности [12–14]. С 1970-х гг. проводятся активные исследования по оценке эффективности использования быстрорастущих подвидов и гибридов древесных растений (ивы, тополя, осины и др.). Плантации быстрорастущих древесных культур имеются практически во всех странах ЕС, а также США и Канаде [15–18]. В западной литературе существует специальный термин для таких плантаций – SRC (short rotation coppice). Они обеспечивают максимально эффективный выход биотоплива на 3–4 год с начала закладки производственной плантации. Быстрые темпы роста возможны при селекции и использовании специальных быстрорастущих сортов или клонов. Короткоцикловые посадки древесных культур главным образом используют для получения биотоплива для возобновляемой энергетики.

Возможность использования короткоцикловых плантаций древесных культур для целей фиторемедиации обуславливается быстрыми темпами роста и, соответственно, накопления биомассы, а также тем, что однократно заложенная плантация может расти на том же месте более 20 лет не теряя продуктивности, при этом уборка биомассы осуществляется каждые 3–4 года. Следовательно, перераспределение

³Щур А. В. Экологические подходы к оптимизации состава почвенного микроценоза как основа поддержания стабильной производительной способности агроэкосистем: автореф. дис. ... д-ра биол. наук, 03.02.08 – экология (биология). Владимир, 2016.

радионуклидов в другие экосистемы за этот период будет минимальным. Остается проблема безопасного использования биомассы. Результаты исследования данного вопроса представлены в публикации.

Материалы и методы исследования

Для оценки уровня и условий накопления радионуклидов в биомассе быстрорастущих древесных культур была заложена экспериментальная плантация ивы в Кричевском р-не Могилевской обл. Выбор ивы как объекта исследований объясняется пластичностью растения и способностью произрастать в условиях повышенной увлажненности и на почвах, характеризующихся низким уровнем плодородия, а также наиболее высокой продуктивностью по сравнению с другими энергетическими культурами в условиях Республики Беларусь.

Полевые опыты заложены на территории загрязненной радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС [19]. Загрязнение территорий в зоне проведения полевого эксперимента обуславливается выпадением ^{137}Cs с радиоактивными осадками в постчернобыльский период.

Плотность загрязнения почв ^{137}Cs на опытных участках составляла от 5 до 10 Ки/км² или от 185 до 370 Бк/м². Другие радионуклиды, например, ^{90}Sr на данной территории присутствуют в незначительных количествах. Поэтому в наших экспериментах определялось накопление в биомассе ивы ^{137}Cs .

Техника закладки и проведения полевых опытов проводилась согласно методике полевого опыта [20].

Площадь опытной делянки составляла 25 м². Повторность четырехкратная. Расположение делянок в пределах повторности рендомизированное. Способ размещения повторений на опытном участке – сплошной с расположением в четыре ряда (яруса). Расстояние между опытными делянками составляло 1,4 м, между ярусами – 1 м. Схема посадки растений ленточная двухрядная, с расстоянием между лентами 140 см, между рядами в ленте 70 см и между растениями в ряду 45 см.

Определение ^{137}Cs в почвенных и растительных образцах проводили на полупроводниковом гамма-спектрометре ADCAM-100. Для количественной оценки поступления ^{137}Cs из почвы в растения определяли коэффициенты перехода (КП), под которыми понимается отношение удельной активности радионуклида в сухой (или с естественной влажностью) массе растительного материала к активности радионуклида на единицу площади поверхности почвы (плотность загрязнения или запас радионуклида).

Результаты исследования и их обсуждение

Одним из условий возделывания сельскохозяйственных культур на почвах, загрязненных радионуклидами, является получение растениеводческой продукции, соответствующей по содержанию радионуклидов нормативным требованиям (РДУ-99)⁴. Возделывание быстрорастущих энергетических культур, в том числе ивы, на загрязненных радионуклидами территориях, является альтернативным производству традиционной сельскохозяйственной продукции подходом. Возможность возделывания ивы на загрязненных радионуклидами территориях определяется принятым в республике допустимым уровнем содержания цезия-137 (РДУ /ЛХ-2001) в древесном топливе, не превышающем 740 Бк/кг⁵.

Для прогнозирования возможности получения нормативно чистой древесины ивы на загрязненных радионуклидами территориях необходим анализ уровня накопления радионуклидов и коэффициентов их перехода в системе «почва – растение». В соответствии с литературными данными, радионуклиды распределяются в органах растений неравномерно [21]. Основное количество радионуклидов концентрируется в корнях, и минимальное в генеративных органах растений. Накопление радионуклидов зависит от расположения, типа и мощности корневой системы. Растения с корневой системой, расположенной в верхних слоях почвы, к которым относится ива, накапливают больше радионуклидов, чем растения со стержневой системой, которая проникает в более глубокие и относительно «чистые» почвенные горизонты. Оценка поступления ^{137}Cs для отдельных частей растения необходима для агротехнического и экологического обоснования возделывания ивы с учетом возможности использования древесины в качестве биотоплива. Согласно технологии возделывания, плантации ивы остаются на одном месте 20–25 лет. Древесина ивы как биотопливо убирается раз в 3–4 года, листья и часть боковых побегов возвращаются в почву. Таким образом, для расчета баланса, прогнозирования и моделирования передвижения ^{137}Cs в системе «почва – растение», необходимо знать его содержание в каждой из частей биомассы.

⁴Цыбулько Н. Н. и др. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2012–2016 годы. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС. Минск, 2012.

⁵Об утверждении гигиенических нормативов «Республиканские допустимые уровни содержания цезия-137 в древесине, продукции из древесины и древесных материалов и прочей пищевой продукции лесного хозяйства (РДУ/ЛХ-2001)»: [Электронный ресурс]. Постановление Гл. гос. санитар. врача Респ. Беларусь, 11 янв. 2001 г., № 4. URL: https://radbez.bsmu.by/library/GN_2.6.1.10-1-01-2001.pdf (дата обращения: 15.01.2023).

Одним из эффективных методов, препятствующих накоплению ^{137}Cs в продукции, является внесение минеральных, прежде всего, калийных удобрений. Цезий, как элемент первой группы периодической таблицы, является химическим аналогом калия и от баланса этих элементов в почве зависит аккумуляция ^{137}Cs растениями. При этом происходит увеличение концентрации обменных катионов в почве, что приводит к усилению антагонизма между радионуклидами и внесенными катионами, уменьшению подвижности радионуклидов, повышению биомассы растений за счет оптимального минерального питания⁶. Известно, что внесение высоких доз калийных удобрений является эффективным приемом, ограничивающим поступление ^{137}Cs в растения⁷. В связи с этим в наших экспериментах изучалось влияние внесения различных доз калия на поступление ^{137}Cs в биомассу ивы.

Результаты расчета коэффициентов перехода ^{137}Cs в биомассу ивы в зависимости от доз внесения удобрений представлены в таблице.

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в фитомассу растений сорта *Jorr Salix viminalis*, $K_i \times 10^{-3} \text{ м}^2\text{кг}^{-1}$

Transferring coefficient ^{137}Cs in phytomass of plants *Jorr* variety *Salix viminalis*, $K_i \times 10^{-3} \text{ м}^2\text{кг}^{-1}$

Вариант	КП, $K_i \times 10^{-3} \text{ м}^2\text{кг}^{-1}$.			
	Листья	Древесина	Корни	Ветви
Контроль	0,052	0,031	0,939	0,061
$\text{N}_{30}\text{P}_{60}\text{K}_{30}$	0,045	0,025	0,612	0,047
K_{30}	0,051	0,024	0,564*	0,042
K_{60}	0,041*	0,015*	0,393*	0,026*
K_{90}	0,032*	0,009*	0,229*	0,019*
N_{30}	0,048	0,028	0,693	0,055
N_{60}	0,052	0,030	0,634	0,052
HCP_{05}	0,011	0,010	0,337	0,021

Примечание. *Статистически значимые по наименьшей существенной разнице (НСР) различия с контролем при $p < 0,05$.

В результате исследований установлено снижение коэффициента перехода ^{137}Cs (КП) в фитомассу растений ивы на фоне внесения калийных удобрений, наиболее значительное в вариантах с использованием их средней и высокой доз. Удобрения вносились однократно перед посадкой ивы. Как следует из представленных данных, достоверная разница по величине коэффициента перехода ^{137}Cs как в древесину, так и корни растений ивы имела место в вариантах с дозами внесения калия 60 и 90 кг/га. Для азота подобных тенденций не наблюдалось, разница коэффициентов перехода ^{137}Cs в растения на контрольном варианте и вариантах с различными дозами внесения азота была в пределах достоверности. Коэффициенты перехода ^{137}Cs во втором варианте опыта в сравнении с третьим вариантом статистически не отличались для корней, листьев и древесины. На втором и третьем вариантах опыта вносились одинаковые дозы калия (30 кг/га) и разные дозы фосфора и азота. Положительного эффекта от внесения этих элементов при одинаковых дозах калия, на накопление ^{137}Cs в биомассу ивы установлено не было [22].

По полученным данным были построены уравнения зависимости накопления радиоактивного цезия для корней, листьев, древесины и ветви (боковые побеги) от норм внесения калия, как основного фактора, снижающего поступление ^{137}Cs в растения ивы [23; 24].

По результатам трехлетних экспериментов были построены графики зависимости коэффициентов перехода ^{137}Cs в древесину и корни ивы от доз внесения калийных удобрений от 0 до 90 кг/га (рис. 1, 2).

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в древесину ивы изменялись от величины $0,005 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ до $0,042 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, в зависимости от доз внесения калийных удобрений. Установлено, что при внесении калийных удобрений в дозе 90 кг/га, величина поступления ^{137}Cs в древесину ивы уменьшается в 3 раза. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в корни ивы более чем в двадцать раз превышали коэффициенты перехода радионуклида в древесину. Внесение калийных удобрений в дозе 90 кг/га снижало коэффициент перехода ^{137}Cs в корни приблизительно в четыре раза.

⁶Цыбулько Н. Н. и др. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2012–2016 годы. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС. Минск, 2012.

⁷Там же.

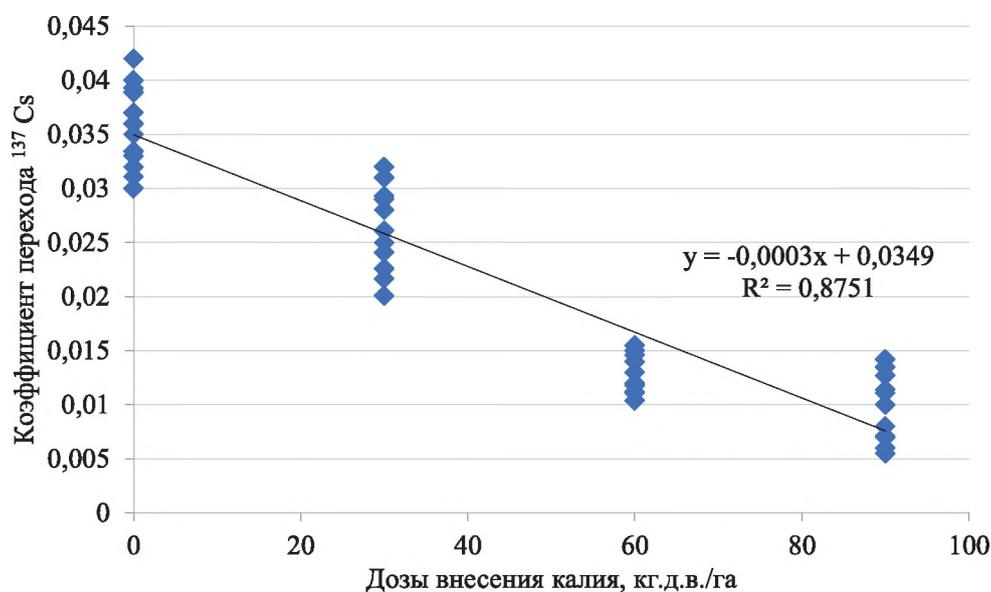


Рис. 1. Зависимость коэффициента перехода ¹³⁷Cs в древесину ивы от доз внесения калийных удобрений на примере сорта *Jorr Salix viminalis*

Fig. 1. Transferring coefficient ¹³⁷Cs in willow wood in depends of rates of potassium fertilizer application on example of *Jorr* variety *Salix viminalis*

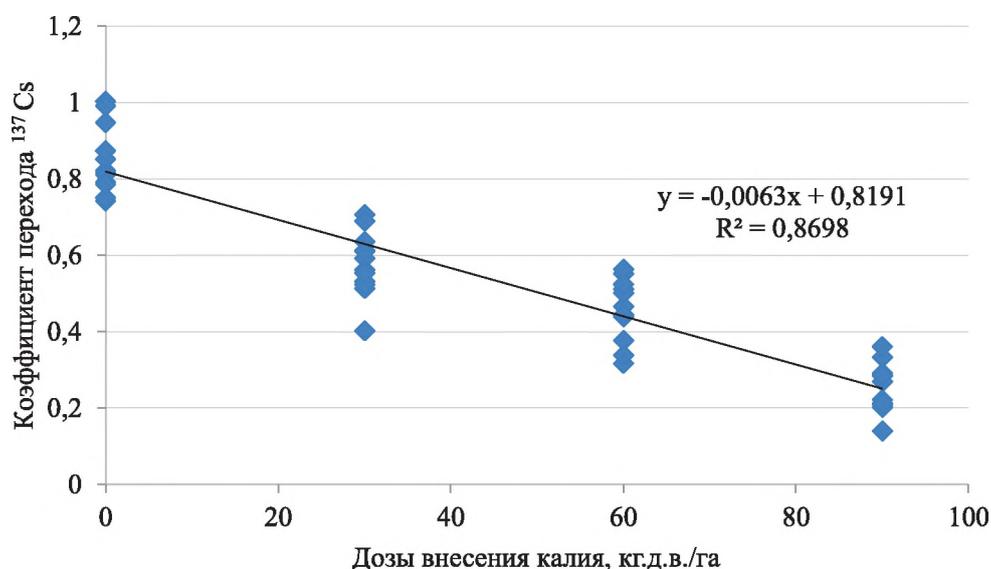


Рис. 2. Зависимость коэффициента перехода ¹³⁷Cs в корни ивы от доз внесения калийных удобрений на примере сорта *Jorr Salix viminalis*

Fig. 2. Transferring coefficient ¹³⁷Cs in willow root in depends of rates of potassium fertilizer application on example of *Jorr* variety *Salix viminalis*

В наших экспериментах наиболее высокий коэффициент перехода ¹³⁷Cs был характерен для корней ивы ($0,229 - 0,939 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ кг}^{-1}$) и листьев ($0,032 - 0,052 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ кг}^{-1}$), и самый низкий для древесины ($0,009 - 0,031 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ кг}^{-1}$). Похожие результаты были получены в экспериментах шведских исследователей [28]. Для корней и листьев коэффициенты перехода ¹³⁷Cs были выше, чем для древесины (стеблей), и варьировали от $0,1 \times 10^{-3}$ до $2,6 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ кг}^{-1}$. В Швеции плотность загрязнения почв экспериментального участка составила около 141 кБк/м^2 , что ниже, чем в Кричевском р-не. Отличие результатов можно также объяснить разницей гранулометрического состава почв: песчаные в Швеции и легкосуглинистые в Беларуси. Коэффициенты перехода ¹³⁷Cs для других культур для песчаных почв также выше по сравнению с суглинистыми⁸.

⁸Цыбулько Н. Н. и др. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2012–2016 годы. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС. Минск, 2012.

По результатам других экспериментов, также в Швеции установлено, что активность ^{137}Cs в различных органах растений ранжируется по степени снижения: корни > листья > проростки > древесина (стебли) [27]. При этом коэффициенты перехода были ниже и сопоставимы с данными наших экспериментов.

Для оценки перспективы внедрения плантаций быстрорастущей ивы на загрязненных радионуклидами территориях необходим прогнозный анализ накопления ^{137}Cs и коэффициентов его перехода за весь срок эксплуатации плантации, то есть 20–25 лет. С этой целью на основании экспериментальных данных были разработаны прогнозные модели изменения удельной активности древесины и корней ивы в течение двадцати одного года в зависимости от плотности загрязнения почвы и при трехлетнем цикле уборке древесины.

При моделировании учитывались следующие аспекты:

- плотность загрязнения почвы;
- период полураспада ^{137}Cs ;
- урожай биомассы;
- коэффициенты перехода ^{137}Cs в биомассу ивы в зависимости от доз внесения калия.

Модель изменения удельной активности древесины при плотности загрязнения ^{137}Cs , соответствующей среднему показателю для экспериментального участка, расположенного в Кричевском р-не Могилевской обл., представлена на рис. 3. Максимальный срок эксплуатации плантации рассчитывался на семь периодов уборки без учета первого года закладки плантации, то есть 22 года.

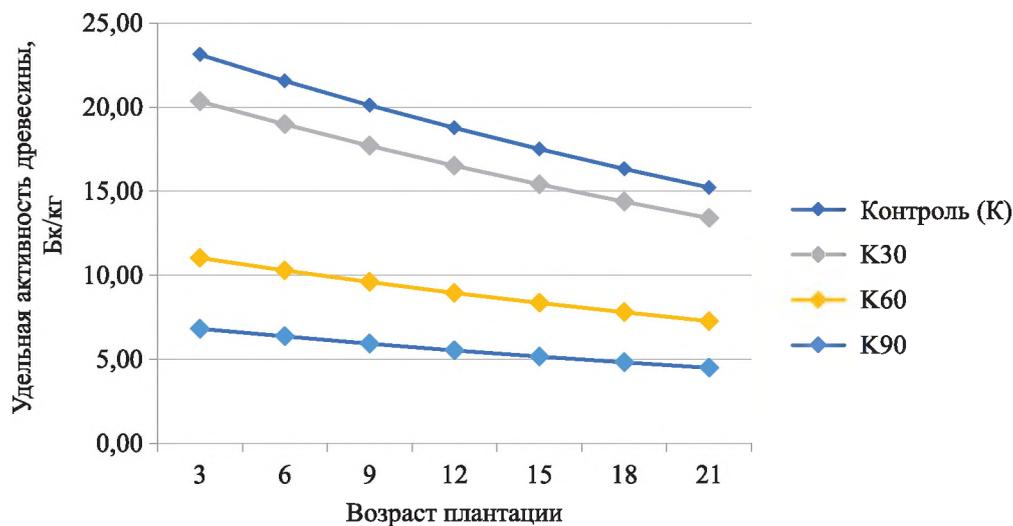


Рис. 3. Прогнозная модель изменения удельной радиоактивности древесины сорта *Jorr Salix viminalis* в зависимости от плотности загрязнения дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы на фоне внесения калийных удобрений

Fig. 3. Model of wood radioactivity of *Jorr* variety *Salix viminalis* variation in depends of level of soddy-podzolic medium loamy soil pollution with application of potassium fertilizer

Как следует из полученных трендов, прогнозируемое накопление радионуклида в древесине было значительно ниже уровня, допустимого по нормативам Республики Беларусь. По результатам моделирования даже при высоком уровне загрязнения (40 Ки/км^2), когда земли не должны использоваться для сельскохозяйственного производства и выводятся из оборота, содержание радионуклида в древесине будет значительно ниже допустимого (от 35 до 120 Бк/кг, в зависимости от дозы внесения калийных удобрений). Таким образом, можно прогнозировать, что даже при минимальной дозе внесения калия содержание радионуклида в древесине ивы не превысит допустимого нормативами показателя, и она может быть использована в качестве возобновляемого источника энергии. Удельная активность ^{137}Cs в золе полученной после сжигания древесины ивы на экспериментальном участке без внесения минеральных удобрений составила 198,5 Бк/кг с погрешностью 5,1% [27]. В Республике Беларусь содержание ^{137}Cs в золе не нормируется.

Заключение

Загрязнение радионуклидами является одним из наиболее опасных негативных факторов воздействия на почвенные и прилегающие к ним экосистемы. Преимущество фиторемедиации как метода дезактивации загрязненных земель определяется возможностью поддержания (улучшения) плодородия почв, относительно невысокими затратами и постепенным снижением уровня содержания радионуклидов. При оценке эффективности фиторемедиации необходимо учитывать, что интенсивная аккумуляция радионуклидов

растениями обеспечит быстрые темпы дезактивации почв, но экологически целесообразная утилизация полученной биомассы сопряжена с дополнительными экономическими затратами. Поэтому более целесообразным является направление фиторемедиации, сфокусированное на постепенной рекультивации и очистке почв от радионуклидов с одновременным использованием биомассы на технические цели, в том числе производство энергии. Наши эксперименты свидетельствуют, что прогнозируемое накопление ^{137}Cs в древесине быстрорастущей ивы значительно ниже уровня, допустимого по нормативам Республики Беларусь, даже при высоком уровне загрязнения почв (до 40 Ки/км^2), когда они не должны использоваться для сельскохозяйственного производства и выводятся из хозяйственного оборота.

При этом необходимо учитывать:

- основным фактором снижения поступления ^{137}Cs в биомассу ивы является внесение повышенных доз калийных удобрений;
- коэффициент перехода ^{137}Cs в корни растений ивы в 25 раз превышает его величину для древесины и в 16 раз для листьев;
- в соответствии с технологией возделывания растений ивы на энергетические цели, плантация располагается на одном месте более чем на 20 лет и, как следствие, ^{137}Cs частично аккумулируется в корнях растений на весь этот срок, не попадая в окружающую среду;
- удельная активность ^{137}Cs в золе, полученной после сжигания древесины ивы на экспериментальном участке без внесения минеральных удобрений, составила $198,5 \text{ Бк/кг}$, поэтому дополнительные мероприятия для ее захоронения не требуются. Зола может быть использована в качестве удобрения для энергетических плантаций ивы и других целей.

Библиографические ссылки

1. Люцко АМ, Ролевич ИВ, Тернов ВИ. *Чернобыль: шанс выжить*. Минск: Полымя; 1996.
2. Цыбулько НН. Радиоактивное загрязнение территории Беларуси: динамика и современное состояние. *Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География*. 2012;1:80–84.
3. Чернуха ГА, Лазаревич НВ, Лаломова ТВ. Радиационная безопасность. Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия; 2005.
4. Djelic G, Krstic D, Stajic J, et al. Transfer factors of natural radionuclides and ^{137}Cs from soil to plants used in traditional medicine in central Serbia. *Journal of Environmental Radioactivity* 2016;158–159:81–88.
5. Минюк ЗИ, Шароваров ГА. Современные методы очистки загрязненных территорий. *Вестник МДУ имя А. А. Куляшова*. 2008;2,3(30):173–178.
6. Александрова ЖН. Методика оценки перспектив фиторемедиации радиоактивно загрязненных почв. *Вестник НЯЦ РК*. 2018;4:79–82.
7. Митаев МИ, Джантаева МБ. Фиторемедиация загрязненных почв на урбанизированных территориях (на примере г. Грозный). *Известия чеченского государственного университета*. 2018;3(11):64–68.
8. Демин АВ, Рыбальченко ИВ, Милькина ИВ. Технологии устойчивого развития территорий: фиторемедиация как инновационный метод санации депрессивных территорий. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Государственное и муниципальное управление*. 2022;9(2).124–136. <https://doi.org/10.22363/2312-8313-2022-9-2-124-136>
9. Киреева НА, Григориади АС, Багаутдинов ФЯ. Фиторемедиация как способ очищения почв, загрязненных тяжелыми металлами. *Теоретическая и прикладная экология*. 2011;3:4–9.
10. Бекузарова СА, Ханиева ИМ, Азубеков ЛХ. Фиторемедиация токсических почв. *Успехи современного естествознания*. 2018;12:345–352.
11. Гурина ИВ и др. *Агроэкологическое обоснование ведения сельскохозяйственного производства на мелиорируемых длительно используемых, нарушенных и загрязненных землях*. Рязань: ФГБОУ ВПО РГАТУ; 2014.
12. Муратова АО и др. Физиолого-биохимические реакции *Miscanthus* × *giganteus* на загрязнение почвы тяжелыми металлами. *Экобиотех*. 2019;2(4):482–493.
13. Rodzkin A, Kundas S, Chamenak Y. The assessment of cost of biomass from post-mining peaty lands for pellet fabrication. *Environmental and Climate Technologies*. 2018;22(1):118–131.
14. Kundas S, Wichtman W, Rodzkin A. Use of biomass from wet peatland for energy purpose. International and renewable energy sources as alternative primary energy sources in the region: 8 International science conference. Lviv: [publisher unknown]; 2015. p. 77–81.
15. Dimitriou I, Aronsson P. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva*. 2005;56(221):47–50.
16. Tuck G, et al. The potential distribution of bioenergy crops in Europe under present and future climate. *Biomass and Bioenergy*. 2006;30(3):183–197.
17. Stern, WB. Stroh als Quelle erneuerbarer Energie. *Swiss Bulletin für angewandte Geologie*. 2010;15(1):95–103.
18. Mola-Yudego B, et al. Reviewing wood biomass potentials for energy in Europe: the role of forests and fast-growing plantations. *Biofuels*. 2017;8(4):401–410.
19. Богдевич ИМ, и др. *Земля Беларуси. 2001*. Минск: БЕЛНИЦЗЕМ; 2002.
20. Доспехов БА. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*. Москва: Агропромиздат; 1985.
21. Анненков БН, Юдинцева ЕВ. *Основы сельскохозяйственной радиоэкологии*. Москва: Агропромиздат; 1991.
22. Oljača R, Rodzkin O, Krstić B. *Fiziologija vrba = Willow physiology*. Laktaši: University Banja Luka; 2017.
23. Rodzkin AI, Ivanykovich VA, Pronko SK. Willow wood production on radionuclide polluted areas. *Matica Srpska = Journal for Natural Sciences*. 2010;119:105–113.

24. Rodzkin A, Khroustalev B, Kundas S. Potential of Energy Willow Plantations for Biological Reclamation of Soils Polluted by ^{137}Cs and Heavy Metals, and for Control of Nutrients Leaking into Water Systems. *Environmental and Climate Technologies*. 2019;23(3):43–56.
25. Rosen K, von Fircks Y, Vinichuk M, Sennerby-Forsse L. Accumulation of ^{137}Cs after potassium fertilization in plant organs of *Salix viminalis* L. and in combusted ash. *Biomass and bioenergy*. 2011;35:2765–2772.
26. Rosen K, von Fircks Y. Uptake and distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in *Salix viminalis* plants. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002;63:1–14.
27. Rodzkin A, Orlovich S, Krstich B. The perspective of application of ash from willow wood as a mineral fertilizer. In: Safe food. Processing of XVIII international eco-conference, 1–4 October 2014. Novi Sad (Serbia): [publisher unknown]; 2014. p. 211–218.

References

1. Ljucko AM, Rolevich IV, Ternov VI. *Chernobyl': shans vyshit'* [Chernobyl': chance for surviving]. Minsk: Polymja; 1996. Russian.
2. Cybul'ko, N. N. Radionuclide pollution of the Belarus area: dynamic and modern situation. *Vestnik. BGU. Seria 2, Himija. Biologija. Geografija*. 2012;1:80–84. Russian.
3. Chernuha GA., Lazarevich NV, Lalomova TV. *Radiacionnaya bezopasnost* [Radioactive safety: Textbook. Committee of Chernobyl under the Council of Ministry of Belarus]. Gorki: Belarus. State agricultural Academy. 2005. Russian.
4. Djelic G, Krstic D, Stajic J, et al. Transfer factors of natural radionuclides and ^{137}Cs from soil to plants used in traditional medicine in central Serbia. *Journal of Environmental Radioactivity* 2016;158–159:81–88.
5. Minjuk, ZP, Sharovarov GA. The modern methods of rehabilitation of polluted areas. *Vesnik MDU imja A. A. Kuljashova*. 2008;2, 3(30):173–178. Russian.
6. Aleksandrova ZhN. Methodology of assessment of perspective for phytoremediation of radionuclide polluted soils. *Vestnik NJaC RK* 2018;4:79–82. Russian.
7. Mitaev MI, Dzhantaeva MB. Phytoremediation of pollutes soil on contaminated areas (example of Grodno). *Izvestija chechenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018;3(11):64–68. Russian.
8. Demin AV, Rybal'chenko IV, Mil'kina IV. Technology of sustainable development of areas: phytoremediation as innovative method for sanitation of depressive areas. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Serija: Gosudarstvennoe i municipal'noe upravlenie*. 2022;9(2).124–136. <https://doi.org/10.22363/2312-8313-2022-9-2-124-136>. Russian.
9. Kireeva NA, Grigoriadi AS, Bagautdinov F Ja. Phytoremediation as method for cleaning of soils polluted by heavy metals. *Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija*. 2011;3:4–9. Russian.
10. Bekuzarova SA, Hanieva IM, Azubekov LH. Phytoremediation of toxic soils. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniija*. 2018;12:345–352. Russian.
11. Gurina IV, et al. *Agroekologicheskoe obosnovanie vedeniya sel'skohozyajstvennogo proizvodstva na melioriruemyh dlitel'no ispol'zuemyh, narushennyh i zagryaznennyh zemlyah: monografiya*. [Agroecological base for agricultural production of drained, degraded, and polluted soils: monograph]. Rjazan': FGBOU VPO RGATU; 2014. Russian.
12. Muratova AJu, et al. Physiology-biochemical reaction *Miscanthus × giganteus* for pollution of soils by heavy metals. *Jekobiotek*. 2019;2:(4):482–493. Russian.
13. Rodzkin A, Kundas S, Charnenak Y. The assessment of cost of biomass from post-mining peaty lands for pellet fabrication. *Environmental and Climate Technologies*. 2018;22(1):118–131.
14. Kundas S, Wichtman W, Rodzkin A. Use of biomass from wet peatland for energy purpose. International and renewable energy sources as alternative primary energy sources in the region: 8 International science conference. Lviv: [publisher unknown]; 2015. p. 77–81.
15. Dimitriou I, Aronsson P. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva*. 2005;56(221):47–50.
16. Tuck G, et al. The potential distribution of bioenergy crops in Europe under present and future climate. *Biomass and Bioenergy*. 2006;30(3):183–197.
17. Stern, WB. Stroh als Quelle erneuerbarer Energie. *Swiss Bulletin für angewandte Geologie*. 2010;15(1):95–103.
18. Mola-Yudego B, et al. Reviewing wood biomass potentials for energy in Europe: the role of forests and fast-growing plantations. *Biofuels*. 2017;8(4):401–410.
19. Bogdevich IM, i dr. *Zemlya Belarusi. 2001* [Soil of Belarus. 2001]. Minsk: BELNICZEM; 2002. Russian.
20. Dosphehov, BA. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovanij)* [Methodology of the field experiment (with statistical methods of results assessment)]. Moscow: Agropromizdat; 1985. Russian.
21. Annenkov BN, Judinceva EV. *Osnovy sel'skohozyajstvennoj radioekologii*. [The base of agricultural radioecology]. Moscow: Agropromizdat; 1991. Russian.
22. Oljača R, Rodzkin O, Krstič B. *Fiziologija vrba = Willow physiology*. Laktaši: University Banja Luka; 2017.
23. Rodzkin AI, Ivanykovich VA, Pronko SK. Willow wood production on radionuclide polluted areas. *Matica Srpska = Journal for Natural Sciences*. 2010;119:105–113.
24. Rodzkin A, Khroustalev B, Kundas S. Potential of Energy Willow Plantations for Biological Reclamation of Soils Polluted by ^{137}Cs and Heavy Metals, and for Control of Nutrients Leaking into Water Systems. *Environmental and Climate Technologies*. 2019;23(3):43–56.
25. Rosen K, von Fircks Y, Vinichuk M, Sennerby-Forsse L. Accumulation of ^{137}Cs after potassium fertilization in plant organs of *Salix viminalis* L. and in combusted ash. *Biomass and bioenergy*. 2011;35:2765–2772.
26. Rosen K, von Fircks Y. Uptake and distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in *Salix viminalis* plants. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002;63:1–14.
27. Rodzkin A, Orlovich S, Krstich B. The perspective of application of ash from willow wood as a mineral fertilizer. In: Safe food. Processing of XVIII international eco-conference, 1–4 October 2014. Novi Sad (Serbia): [publisher unknown]; 2014. p. 211–218.

Статья поступила в редколлегию 20.01.2023.
Received by editorial board 20.01.2023.

УДК 57.043

ОСОБЕННОСТИ ПОСТЛУЧЕВЫХ НАРУШЕНИЙ АККУМУЛЯЦИИ ИОНОВ КАЛЬЦИЯ ВО ВНУТРИКЛЕТОЧНЫХ ДЕПО ТРОМБОЦИТОВ В РАЗЛИЧНЫЕ СРОКИ ПОСТЛУЧЕВОГО ПЕРИОДА

О. Г. ПАРХИМОВИЧ¹⁾, О. Д. БИЧАН²⁾, К. Я. БУЛАНОВА¹⁾

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

²⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Ионы кальция являются важным внутриклеточным регулятором, повышение концентрации которых в цитоплазме играет ключевую роль в определении функциональной активности тромбоцитов, связанной с агрегацией тромбоцитов и реакцией высвобождения. Основным путем уменьшения концентрации свободных ионов кальция в цитоплазме тромбоцита – активация Ca^{2+} -АТФазы внутриклеточных депонирующих структур и плазматической мембраны, уменьшающих цитоплазматическое содержание кальция за счет его обратного захвата в депо (ресеквестрация) и выброса Ca^{2+} из клетки. Тромбоциты экспрессируют две изоформы Ca^{2+} -АТФазы в разных депонирующих структурах (SERCA2b и SERCA3) и две изоформы Ca^{2+} -АТФазы плазматической мембраны (PMCA1b и 4b). Изоформа SERCA2b, являющаяся Ca^{2+} -АТФазой плотной тубулярной системы, ингибируется тапсигаргином. Изоформа SERCA3, представленная

Образец цитирования:

Пархимович О.Г., Бичан О.Д., Буланова К.Я. Особенности постлучевых нарушений аккумуляции ионов кальция во внутриклеточных депо тромбоцитов в различные сроки постлучевого периода. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;1:51–58.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-51-58>

For citation:

Parkhimovich O.G., Bichan O.D., Bulanova K.Ya. Features of post-radiation disturbances in the accumulation of calcium ions in intracellular platelet depots at different times of the post-radiation period. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;1:51–58. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-51-58>

Авторы:

Ольга Георгиевна Пархимович – преподаватель кафедры экологической химии и биохимии.

Ольга Дмитриевна Бичан – заведующая учебной лабораторией физического факультета.

Клавдия Яковлевна Буланова – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры экологической химии и биохимии.

Authors:

Olga G. Parkhimovich, lecturer at the department of environmental chemistry and biochemistry.

olga_parkhimovich@mail.ru

Olga D. Bichan, head of the educational laboratory of the faculty of physics.

bichan@bsu.by

Klavdiya Ya. Bulanova, PhD (biology), docent; associate professor at the department of environmental chemistry and biochemistry.
bulanova_home@tut.by

в лизосомоподобных органеллах, обладает низкой чувствительностью к тапсигаргину, но высокой к tBHQ (2,5-ди-(трет-бутил)-1,4-гидрохинон). При стимуляции высокими концентрациями тапсигаргина и иономицином, вызывающими полное опустошение кальциевых депо тубулярной системы и лизосомоподобных органелл, в бескальциевой среде обнаруживаются различия в уровнях аккумулированного кальция в норме и в постлучевой период: отмечается повышение концентрации кальция на 3-и сутки в 1,4 раза. В структурах тубулярной системы тромбоцитов при действии низких концентраций тапсигаргина, ингибирующих SERCA2b Ca^{2+} -АТФазы тубулярных систем, выявлено изменение в содержании депонированного кальция у облученных животных с повышением на 3-и сутки. В условиях ингибирования Ca^{2+} -АТФазы SERCA3 в бескальциевой среде в тромбоцитах на 3-и сутки после облучения в дозе 1 Гр также отмечался более интенсивный выход ионов кальция по сравнению с контролем. На 10, 30, 90-е сутки не наблюдалось статистически значимых различий этих показателей.

В кальцийсодержащей среде наблюдалось более значительное поступление ионов кальция извне в цитоплазму вследствие активизации депо-управляемых механизмов в постлучевой период, особенно, на 3-и и 10-е сутки.

Ключевые слова: тромбоциты; γ -облучение; кальций; Ca^{2+} -АТФазы; плотная тубулярная система.

FEATURES OF POST-RADIATION DISTURBANCES IN THE ACCUMULATION OF CALCIUM IONS IN INTRACELLULAR PLATELET DEPOTS AT DIFFERENT TIMES OF THE POST-RADIATION PERIOD

O. G. PARKHIMOVICH^a, O. D. BICHAN^b, K. YA. BULANOVA^a

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

^bBelarusian State University,

4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: O. G. Parkhimovich (olga_parkhimovich@mail.ru)

Calcium ions are an important intracellular regulator; an increase in their concentration in the cytoplasm plays a key role in determining the functional activity of platelets associated with platelet aggregation and the release reaction. The main way to reduce the concentration of free calcium ions in the platelet cytoplasm is the activation of Ca^{2+} -ATPases of intracellular depositing structures and the plasma membrane, which reduce the cytoplasmic content of calcium due to its reuptake in the depot (resequestration) and the release of Ca^{2+} from the cell. Platelets express two Ca^{2+} -ATPase isoforms in different depositor structures (SERCA2b and SERCA3) and two plasma membrane Ca^{2+} -ATPase isoforms (PMCA1b and 4b). The SERCA2b isoform, which is Ca^{2+} -ATPase of the dense tubular system, is inhibited by thapsigargin. The SERCA3 isoform present in acidic organelles has low sensitivity to thapsigargin, but high sensitivity to tBHQ (2,5-di-(tert-butyl)-1,4-hydroquinone). When stimulated with micromolar concentrations of thapsigargin and ionomycin, which cause complete depletion of the calcium depots of the tubular system and acid organelles, differences in the levels of accumulated calcium in the norm and in the post-radiation period are found in a calcium-free medium: an increase in calcium concentration by 1.4 times is noted on the 3rd day. In the structures of the tubular system of platelets, under the action of nmolar concentrations of thapsigargin, which inhibit SERCA2b Ca^{2+} -ATPase of tubular systems, a change in the content of deposited calcium in irradiated animals was revealed with an increase on the 3rd day. Under conditions of inhibition of Ca^{2+} -ATPase SERCA3 in a calcium-free medium in platelets on the 3rd day after irradiation at a dose of 1 Gy, a more intense release of calcium ions was also noted compared to the control. On the 10th, 30th, 90th day, there were no statistically significant differences in these indicators. In the calcium-containing medium, a more significant intake of calcium ions from the outside into the cytoplasm was observed due to the activation of depot-controlled mechanisms in the post-radiation period, especially on the 3rd and 10th days.

Keywords: platelets; γ -irradiation; calcium; Ca^{2+} -ATPase; endoplasmic reticulum.

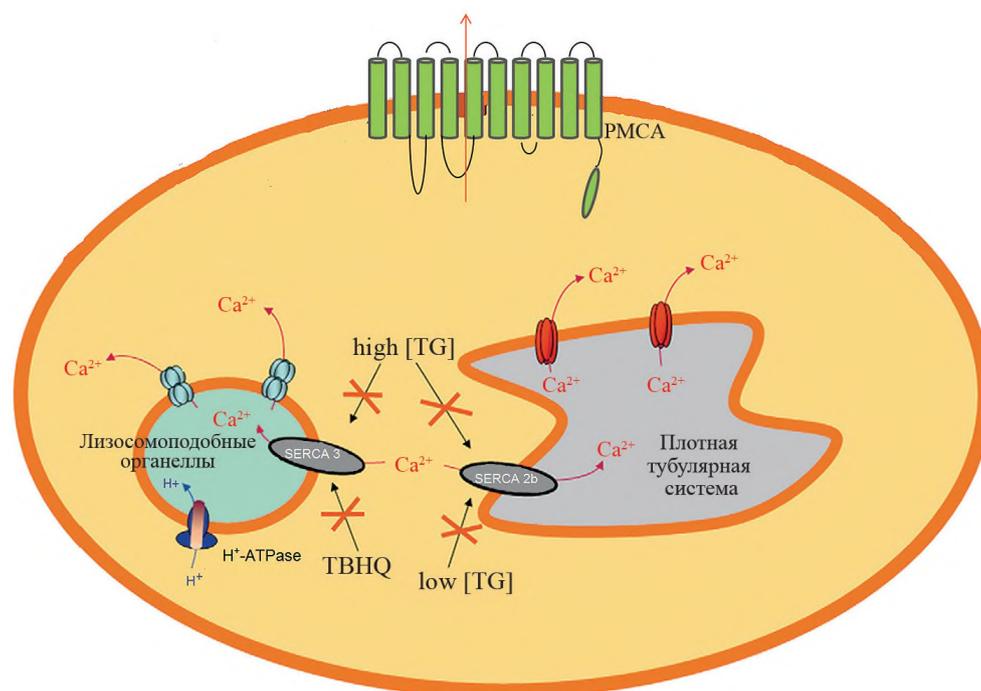
Введение

Общее содержание кальция в тромбоцитах составляет около 60 нмоль/10⁹ клеток. Часть этого кальция (25 %) связана с мембранами тромбоцитов, но значительное его количество содержится в тубулярной системе и плотных гранулах [1; 2].

Концентрация свободных ионов кальция в цитоплазме тромбоцитов (10⁻⁷ моль/л) ниже, чем в плазме (10⁻³ моль/л). Основной вклад в поддержание низкой концентрации цитоплазматического Ca^{2+} в тромбоцитах вносят Ca^{2+} -АТФазы депонирующих систем и плазматической мембраны клеток [3]. Еще одной молекулярной системой снижения концентрации Ca^{2+} в тромбоцитах являются $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ – обменники (NCX) плазматической мембраны, способные перемещать ионы кальция из цитоплазмы тромбоцитов в обмен на ионы натрия, однако они обладают меньшим средством к кальцию, нежели Ca^{2+} -АТФазы [4–6].

Ca^{2+} -АТФазы плазмалеммы (PMCA) переносят Ca^{2+} с цитоплазматической стороны во внешнюю среду, блокируются ортованадатом. PMCA относится к АТФазам Р типа, подтипа II. Структура АТФазы представлена 10 трансмембранными доменами (ТМ) и двумя большими цитоплазматическими доменами между 2 и 3, и 5 ТМ. Ca^{2+} -АТФазы являются молекулярными насосами, использующим для переноса ионов АТФ. Различают две изоформы Ca^{2+} -АТФазы плазматической мембраны (PMCA1b и 4b) [7; 8].

АТФазы тубулярной системы. Тромбоциты экспрессируют две изоформы Ca^{2+} -АТФаз в разных депонирующих структурах (SERCA2b и SERCA3) (рис.). SERCA2b является Ca^{2+} -АТФазой плотной тубулярной системы, изоформа SERCA3 находится в лизосомоподобных органеллах [9]. Однако не столь много известно о способах их регулирования даже в норме, тем более при патологических состояниях различной этиологии, в том числе индуцированных радиацией.



Ca^{2+} -АТФазы депонирующих систем и плазматической мембраны: PMCA – Ca^{2+} -АТФаза плазматической мембраны, SERCA2b – Ca^{2+} -АТФаза плотной тубулярной системы, SERCA3 – Ca^{2+} -АТФаза лизосомоподобных органелл, TG – тапсигаргин, TBHQ – (2,5-ди-(трет-бутил)-1,4-гидрохинон

Выявлено, что после активации тромбоцитов и увеличения уровня $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{цит.}}$, SERCA насосы возвращают Ca^{2+} во внутриклеточные депо, в то время как PMCA качают его из клетки, являясь механизмами, обеспечивающими поддержание концентрации кальция внутри тромбоцитов на определенном уровне [10, 11]. Использование селективных блокаторов различных Ca^{2+} -АТФаз позволяет определить вклад отдельных АТФаз в поддержание низкого базового уровня ионов кальция в цитоплазме в норме, а также выявить постлучевые изменения функций индивидуальных Ca^{2+} -АТФаз разной локализации, их роль в формировании нарушений агрегационной способности тромбоцитов в разные сроки реабилитационного периода.

Материалы и методы исследования

Объектами исследований являлись тромбоциты крови облученных и необлученных беспородных белых крыс зрелого возраста (6–7 мес.) весом 250 ± 30 г. стадного разведения, содержащихся на стандартном рационе питания вивария.

Проведение экспериментов осуществлялось в соответствии с этическими нормами обращения с животными, а также правилами проведения работ с использованием лабораторных животных в научных исследованиях, обоснованными рекомендациями и требованиями «Европейской конвенцией по защите экспериментальных животных» (Директивы 2010/63/EU Европейского Парламента и Совета Европейского Союза по охране животных, используемых в научных целях от 22 сентября 2010 г.).

Перед забором крови крыс наркотизировали тиопенталом натрия (из расчета 45 мг/кг веса животного). Далее фиксировали на спине, привязывая лапки (петли из скрученного бинта захватывали лапки и привязывали к пластмассовым держателям операционного столика). После вскрытия грудной клетки животных, кровь бралась из левого желудочка (проходя через предсердие) короткой иглой с достаточно большим диаметром

и силиконовой трубкой на тупом конце, предварительно промытой раствором ЭДТА (этилендиаминтетрауксусная кислота (15 %)). Кровь стабилизировали 3,8 % раствором цитрата натрия (9:1, объем: объем).

Животных облучали (однократно и равномерно) на установке ИГУР γ -квантами ^{137}Cs в дозе 1 Гр (мощность дозы 0,62 Гр/мин, в течение 1,61 мин). Контролем служили животные соответствующего возраста. Облучение животных проведено на базе ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси». Объемы выборок показателей в экспериментальных и контрольных группах сравнения составляли $n = 16$ (в опытах) и $n = 18$ (в контролях).

Обогащенную тромбоцитами плазму (ОТП) получали центрифугированием крови при 200 г в течение 5 мин при комнатной температуре, бестромбоцитарную плазму получали в результате осаждения форменных элементов крови из ОТП при 650 г в течение 15 мин. Бестромбоцитарную плазму добавляли в ОТП для достижения количества тромбоцитов в среде до 2×10^8 кл/мл.

Для получения отмытых тромбоцитов ОТП разводили фосфатно-солевым буфером (4,3 мМ K_2HPO_4 , 4,3 мМ Na_2HPO_4 , 22,4 мМ NaH_2PO_4 , 113 мМ NaCl , 10 мМ цитрат-Na, 5 мМ D-глюкоза, pH 6,5) в соотношении 1:1 по объему и насливали на фиколл-верографин с плотностью $1,087 \pm 0,005$ г/мл. После центрифугирования при 250 г в течение 15 мин при комнатной температуре тромбоциты располагались в широком мутном слое над кольцом мононуклеаров. Слой тромбоцитов переносили в пластиковые пробирки и осаждали центрифугированием при 650 г в течение 5 мин при комнатной температуре. Осадок после однократного отмывания суспендировали в буферном растворе (pH 6,5), доводя концентрацию клеток до $2-5 \times 10^8$ кл/мл. Проводили микроскопический контроль чистоты выделяемых тромбоцитов: присутствия других форменных элементов крови не обнаружено.

Для количественного определения концентрации кальция в тромбоцитах использовали флуоресцентный зонд Fura-2/AM.

Полученные тромбоциты инкубировали с Fura-2/AM (конечная концентрация 2,5 мкмоль/л). Тромбоциты осаждали центрифугированием при 745 г, 8 мин. Отмытые тромбоциты суспендировали в *HEPES-буфер без Ca^{2+}* (pH 7,4) и довели концентрацию клеток до $2,5 \cdot 10^9$ кл/мл. Исследование кинетики изменения интенсивности флуоресценции нагруженных Fura-2/AM тромбоцитов проводили на длине волны 510 нм при длинах волн возбуждения 340 нм и 380 нм с использованием спектрофлуориметра СМ 2203 «СОЛАР» (Минск, Беларусь). Концентрация Ca^{2+} рассчитывали на основе измерения флуоресценции при возбуждении этими двумя длинами волн по формуле:

$$[\text{Ca}^{2+}] = K_d \frac{R_{\text{max}380}}{R_{\text{min}380}} \frac{F - F_{\text{min}}}{F_{\text{max}} - F}, \quad (1)$$

где K_d – константа диссоциации комплекса Fura-2/AM с кальцием,

$F = \frac{R_{340}}{R_{380}}$ – текущее отношение флуоресцентных сигналов,

F_{min} – то же отношение в растворе с низкой концентрацией Ca^{2+} ,

F_{max} – то же отношение в растворе с высокой концентрацией Ca^{2+} (max и min при добавлении тритона (10 %) и ЭГТА (100 мкмоль/л) соответственно),

K_d – равно 224 нмоль/л.

Анализ и статистическая обработка данных проводилась на вычислительном комплексе IBM-PC/AT. С использованием программного обеспечения *GraphPad Prism 9* (Сан-Диего, Калифорния, США). Достоверность различий между средними значениями изучаемых параметров оценивалась по t-критерию Стьюдента.

Результаты исследования и их обсуждение

Предварительными исследованиями [12] выявлено, что в ближайшие сроки после облучения (3, 10, 30-е сутки) в дозе 1 Гр в тромбоцитах отмечается повышенный, по сравнению с контролем, базальный уровень ионов кальция в цитоплазме тромбоцитов. В контроле уровень кальция в бескальциевой среде составил $34,2 \pm 6,6$ нмоль/л, в кальцийсодержащей среде – $52,9 \pm 8,8$ нмоль/л. Максимально выраженное радиационно-стимулированное увеличение базального уровня цитоплазматического кальция характерно для 3-их суток постлучевого периода, как при отсутствии ($83,9 \pm 9,2^*$ нмоль/л), так и в присутствии ($173,7 \pm 15,5^*$ нмоль/л) ионов кальция во внешней среде. Повышенный уровень цитоплазматического кальция приводит к увеличению агрегационной активности тромбоцитов, что способствует возрастанию риска тромбообразования и ишемического поражения органов и систем. Важно было установить какую роль в пострадиационном увеличении уровня кальция в тромбоцитах играют изменения функций Ca^{2+} -АТФаз различной локализации.

В условиях отсутствия ионов кальция во внешней среде снижение уровня мобилизованных ионов Ca^{2+} в цитозоле до базального способны обеспечить Ca^{2+} -АТФазы запасящих структур: плотной тубулярной

системы и лизосомоподобных везикул [13; 14]. В тромбоцитах идентифицировано 2 различные изоформы Ca^{2+} -АТФаз: SERCA2b и SERCA3. Специфическим ингибитором изоформы SERCA2b, которая является Ca^{2+} -АТФазой плотной тубулярной системы, является тапсигаргин (ТГ), действующий на нее в наномолярных концентрациях [15]. Изоформа SERCA3, представленная в содержащих кислую фосфатазу органеллах, обладает низкой чувствительностью к ТГ (и ингибируется только при высоких микромолярных концентрациях ТГ), но высокой – к tBHQ (2,5-ди-(трет-бутил)-1,4-гидрохинону) [16]. Используя эти различия в чувствительности разных изоформ внутриклеточных Ca^{2+} -АТФаз к ингибиторам их активности можно избирательно оценивать их роль в формировании постлучевых нарушений функции тромбоцитов.

Чтобы оценить количество ионов Ca^{2+} , которое максимально накапливается в обоих типах внутриклеточных депо (плотной тубулярной системе и лизосомоподобных органеллах), использовался в качестве ингибитора тапсигаргин в высоких концентрациях (1 мкмоль/л), не позволяющий перемещать ионы кальция из цитоплазмы в разные депонирующие структуры. В дополнительных экспериментах использовался также иономицин (50 нмоль/л), способный вызывать перфорацию мембран. Иономицин является кальциевым ионофором, он образует комплекс с Ca^{2+} в соотношении 1:1, обменивая его на ионы водорода. Оба препарата через разные механизмы приводят к полному истощению обоих типов внутриклеточных Ca^{2+} -депо как с высоким, так и низким уровнем скорости утечки ионов Ca^{2+} .

Проведение данного эксперимента в отсутствии ионов кальция в среде инкубации позволяет оценить общее содержание ионов кальция, аккумулированное в тромбоцитах в отсутствии притока данных ионов извне (табл. 1).

Таблица 1

Изменение концентрации ионов кальция в цитоплазме тромбоцитов при действии иономицина (50 нмоль/л) в присутствии тапсигаргина (ТГ, 1 мкмоль/л) в норме и после облучения животных в дозе 1 Гр

Table 1

Changes in the concentration of calcium ions in the cytoplasm of platelets under the action of ionomycin (50 nmol/l) in the presence of thapsigargin (TG, 1 μmol/l) in normal conditions and after irradiation of animals at a dose of 1 Gy

Параметры	Контроль, нмоль/л Ca^{2+}	После облучения			
		3-и сутки, нмоль/л Ca^{2+}	10-е сутки, нмоль/л Ca^{2+}	30-е сутки, нмоль/л Ca^{2+}	90-е сутки, нмоль/л Ca^{2+}
Тапсигаргин + иономицин	463,8 ± 23,5	632,8 ± 29,3*	549,9 ± 76,8	471,5 ± 33,8	476,5 ± 26,4

Примечание. *Различия достоверны по отношению к контролю ($p < 0,05$).

Исследование особенностей функционирования депо-зависимых кальциевых механизмов выявили в ближайшие сроки постлучевого периода, что в тромбоцитах облученных животных отмечалось максимальное увеличение выхода ионов Ca^{2+} из депо после действия тапсигаргина в присутствии иономицина на 3-и сутки постлучевого периода.

На 10-е, 30-е, 90-е сутки после облучения значения концентраций ионов кальция в цитоплазме достоверно не отличалась от таковых показателей контрольной группы (см. табл. 1).

Таким образом, поскольку при действии иономицина в присутствии тапсигаргина происходит полное опустошение кальциевых депо тромбоцитов, то полученные данные свидетельствуют о том, что на 3-и сутки количество цитоплазматического Ca^{2+} , аккумулированного во внутриклеточных пулах тромбоцитов облученных крыс выше, чем в тромбоцитах контрольной группы и в кровяных пластинках на 10-е, 30-е и 90-е сутки после облучения.

Избирательное ингибирование Ca^{2+} -АТФазы (SERCA2b) низкими концентрациями тапсигаргина (ТГ) (10 нмоль/л) приводило к росту концентрации $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{цит}}$ в цитоплазме тромбоцитов из-за возникающего дисбаланса между процессами, контролирующими выход ионов кальция из депо и процессами обратного их поступления в депонирующие структуры. Так, в контрольной группе уровень кальция увеличивался с $34,2 \pm 6,6$ нмоль/л (базальный уровень кальция в тромбоцитах крыс) до $140,1 \pm 26,7$ нмоль/л (уровень кальция при действии тапсигаргина). Максимальный выход ионов кальция из SERCA2b депо наблюдался на 3-и сутки после облучения, превышая в 1,7 раз уровень контроля. После облучения животных повышение концентрации ионов кальция в тромбоцитах крыс после добавления ТГ на 10, 30, 90-е сутки статистически не отличалось от значений, полученных в контрольной группе животных (табл. 2).

При изучении высвобождения ионов кальция в цитоплазму в бескальциевой среде при ингибировании Ca^{2+} -АТФаз (SERCA3) лизосомоподобных органелл тромбоцитов с использованием tBHQ (20 мкмоль/л) выявлено, что максимальная концентрация высвободившихся ионов кальция в цитоплазму тромбоцитов также отмечалась на 3-и сутки – $189,5 \pm 25,7$ нмоль/л, превышая на 28 % уровень контроля. Тогда как

уровень повышения ионов кальция при добавлении tBHQ (20 мкмоль/л) в бескальциевой среде на 10-е, 30-е, 90-е сутки не отличался от значений в контрольной группе (табл. 3).

Таблица 2

Влияние низких концентраций ТГ (10 нмоль/л) на выход ионов кальция из плотной тубулярной системы тромбоцитов в разные сроки постлучевого периода

Table 2

Effect of low concentrations of thapsigargin (10 nmol/l) on the release of calcium ions from the dense tubular system of platelets at different times of the post-radiation period

Параметры	Контроль	После облучения			
		3-и сутки	10-е сутки	30-е сутки	90-е сутки
Концентрация ионов кальция (нмоль/л) в цитоплазме в присутствии 10 нмоль/л ТГ	140,1 ± 26,7	238,5 ± 17,2*	150,2 ± 16,8	148,1 ± 10,6	123,0 ± 12,0

Примечание. *Различия достоверны по отношению к контролю ($p < 0,05$).

Таблица 3

Особенности поступления ионов кальция в цитоплазму тромбоцитов в присутствии tBHQ (20 мкмоль/л) в бескальциевой среде (100 мкмоль/л ЭГТА)

Table 3

Features of the entry of calcium ions into the cytoplasm of platelets in the presence of tBHQ (20 μmol/l) in a calcium-free medium (100 μmol/l EGTA)

Параметры	Контроль	После облучения			
		3-и сутки	10-е сутки	30-е сутки	90-е сутки
Уровень кальция в цитоплазме (нмоль/л) в присутствии tBHQ (20 мкмоль/л) в бескальциевой среде (100 мкмоль/л ЭГТА)	147,3 ± 17,3	189,5 ± 25,7*	148,9 ± 13,2	134,6 ± 9,3	129,8 ± 18,5

Примечание. *Различия достоверны по отношению к контролю ($p < 0,05$).

Однако добавление ионов кальция в среду инкубации приводило к значительному увеличению входа ионов Ca^{2+} в цитоплазму тромбоцитов.

Высвобождение ионов кальция в цитоплазму при наличии $CaCl_2$ во внеклеточной среде способствовало реализации депо-зависимых механизмов входа ионов кальция через плазматическую мембрану, который осуществляется несколькими белками, среди которых STIM1 (stromal interaction molecule 1), Orai1 (calcium-release activated calcium modulator 1) и некоторые TRPC (transient receptor potential channels).

Депо-управляемое поступление ионов кальция (SOCE, store-operated calcium entry) активируется при изменении внутриклеточной концентрации $[Ca^{2+}]_{цит}$. SOCE функционирует за счет молекулы стромального взаимодействия 1 (STIM1) и способствуют притоку кальция из внутренних депо (плотной трубчатой системы и лизосомоподобных органелл) тромбоцитов. STIM1 является Ca^{2+} сенсорной молекулой [17].

STIM1 содержит два N-концевых EF домена в просвете плотной тубулярной системы, способных связывать ионы кальция. После опустошения депо это связывание прекращается, и STIM1 перераспределяет свои функции, открывая SOC каналы в плазматической мембране. SOC каналы находятся на плазматической мембране и способствуют притоку кальция из внеклеточного пространства, вследствие истощения Ca^{2+} во внутриклеточных хранилищах, вызывая стимуляцию поверхностных рецепторов, сопряженных с каналами семейства TRP («Transient Receptor Potential») [18].

Под воздействием STIM1 в плазмолемме происходит открытие Orai1 канала. Он представляет собой белок плазматических мембран с четырьмя предполагаемыми трансмембранными доменами и внутриклеточными C- и N- терминалями. Было показано, что Orai1 является единицей формирования пор депо – контролируемого кальциевого канала, и является основным каналом плазматической мембраны, участвующим в депо-зависимом входе кальция в тромбоцитах [19].

Добавление $CaCl_2$ в среду при использовании ТГ (10 нмоль/л) показало, что эти механизмы увеличивали свою эффективность в тромбоцитах облученных животных в большей мере, чем в контроле (табл. 4). Максимальный вход ионов кальция в цитоплазму тромбоцитов из внешней среды выявлен на 3-и сутки после облучения. На 10-е сутки уровень кальция также был повышен. К 30-м и 90-м суткам интенсивность

входа ионов кальция уменьшалась, и количество цитоплазматического кальция статистически не отличалось от контрольных показателей.

Схожие данные получены и при действии tBHQ (табл. 4). Внесение 1 мМоль CaCl₂ в среду инкубации после действия tBHQ привело к более значительному поступлению ионов кальция извне в цитоплазму вследствие активизации депо-управляемых механизмов. Эффекты трансмембранного входа ионов кальция в наибольшей степени были выражены на 3-и сутки, несколько снижаясь на 10-е сутки. На 30-е и 90-е сутки постлучевого периода показатели соответствовали контрольным значениям.

Таблица 4

Особенности поступления ионов кальция в цитоплазму тромбоцитов в присутствии тапсигаргина (10 нмоль/л) и tBHQ (20 мкмоль/л) в присутствии CaCl₂ (1 мМоль)

Table 4

Features of the entry of calcium ions into the cytoplasm of platelets in the presence of thapsigargin (10 nmol/l) and tBHQ (20 μmol/l) in the presence of CaCl₂ (1 mmol)

Параметры	Контроль	После облучения			
		3-и сутки	10-е сутки	30-е сутки	90-е сутки
Уровень кальция в цитоплазме (нмоль/л) в присутствии ТГ (10 нмоль/л) в кальцийсодержащей среде	353,5 ± 20,1	1500,2 ± 125,6*	608,9 ± 18,3*	405,8 ± 19,9	368,2 ± 22,3
Уровень кальция в цитоплазме (нмоль/л) в присутствии tBHQ (20 мкмоль/л) и CaCl ₂ (1 мМоль)	662,4 ± 54,9	1275,3 ± 95,3*	885,8 ± 83,2*	604,9 ± 63,7	542,8 ± 97,6

Примечание. *Различия достоверны по отношению к контролю ($p < 0,05$).

Полученные данные свидетельствуют, что в ближайшие сроки после облучения (3-и и 10-е сутки) в тромбоцитах крыс наблюдается рассогласованность в функционировании систем, отвечающих за поступление кальция из внеклеточного пространства и закачку во внутриклеточные депо.

Заключение

При внесении в среду инкубации иономицина (50 нмоль/л) и высоких концентраций тапсигаргина (1 мкмоль/л), вызывающими полное опустошение кальциевых депо тубулярной системы и лизосомоподобных органелл тромбоцитов, в бескальциевой среде обнаруживается увеличение в 1,36 раз уровня аккумулированного кальция на 3-и сутки постлучевого периода по сравнению с контролем.

В бескальциевой среде при действии низких концентраций тапсигаргина (10 нмоль/л), как ингибирующих SERCA2b Ca²⁺-АТФазы тубулярной системы, так и при действии tBHQ (20 мкмоль/л), ингибирующего Ca²⁺-АТФазы SERCA3, в тромбоцитах крыс наблюдается увеличение уровня кальция на 3-и сутки постлучевого периода по сравнению с контрольной группой.

В постлучевом периоде как при наличии ионов кальция в инкубационной среде при действии ТГ, так и tBHQ наблюдается более значительное поступление ионов кальция в цитоплазму тромбоцитов извне на 3-и и 10-е сутки вследствие активизации депо-управляемых механизмов.

Библиографические ссылки

- Berridge MJ, Bootman MD, Roderick HL. Calcium signalling: dynamics, homeostasis and remodeling. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. 2003;7:517–529. DOI: 10.1038/nrm1155.
- Martin V, Bredoux R, Corvazier E. Platelet Ca²⁺ATPases. *Hypertension*. 2000;35:91–102. DOI:10.1161/01.HYP.35.1.91.
- Wuytack F, Papp B, Verboomen H. A sarcoendoplasmic reticulum Ca(2+)-ATPase 3-type Ca²⁺ pump is expressed in platelets, in lymphoid cells, and in mast cells. *Journal of Biological Chemistry*. 1994;2:1410–1416. DOI: 10.1016/S0021-9258(17)42273-3.
- Dean WL. Role of platelet plasma membrane Ca²⁺-ATPase in health and disease. *World Journal of Biological Chemistry*. 2010; 1(9):265-270. DOI:10.4331/wjbc.v1.i9.265.
- Flaumenhaft R. SERCA navigating calcium signaling in platelets. *Blood*. 2016;128(8):1034–1035. DOI: 10.1182/blood-2016-07-723965.
- Martin V, Bredoux R, Corvazier E. Three novel sarco/endoplasmic reticulum Ca²⁺-ATPase (SERCA) 3 isoforms. Expression, regulation, and function of the membranes of the SERCA3 family. *Journal of Biological Chemistry*. 2002;277(27):24442–24452. DOI: 10.1074/jbc.M202011200.
- Varga-Szabo D, Braun A, Nieswandt B. Calcium signaling in platelets. *Journal of thrombosis and haemostasis*. 2009;7:1057–1066. DOI: 10.1111/j.1538-7836.2009.03455.x.
- Berrocal M, Mata AM. The plasma membrane Ca²⁺-ATPase, a molecular target for Tau-induced cytosolic calcium dysregulation. *Neuroscience*. 2022. S0306-4522(22)00198-1. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2022.04.016.

9. Dean WL. Role of platelet plasma membrane Ca²⁺-ATPase in health and disease. *World Journal of Biological Chemistry*. 2010;1(9):265–270. DOI:10.4331/wjbc.v1.i9.265.
10. Feng M, Elaïb Z, Borgel D. NAADP/SERCA3-dependent Ca²⁺ stores pathway specifically controls early autocrine ADP secretion potentiating platelet activation. *Circulation Research*. 2020;127(7):166–183. DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.119.316090.
11. Redondo PC, Rosado JA, Pariente JA. Collaborative effect of SERCA and PMCA in cytosolic calcium homeostasis in human platelets. *Journal of Physiology and Biochemistry*. 2005;61:507–516. DOI: 10.1007/BF03168376.
12. Пархимович О. Г., Бичан О. Д., Буланова К. Я. Постлучевые изменения регуляции цитоплазматического кальция в тромбоцитах, активированных АДФ и тромбином. *Журнал Белорусского государственного университета. Экспериментальная биология и биотехнология*. 2023;1:56–61.
13. Васильева Е. Ф., Брусов О. С. Тромбоциты, гемостаз и психические расстройства. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2019;119:103–108. DOI:10.17116/jnevro2019119111103.
14. Stafford N, Wilson C, Oceandy D. The plasma membrane calcium ATPases and their role as major new players in human disease. *Physiological Reviews*. 2017;97(3):1089–1125. DOI: 10.1152/physrev.00028.201.
15. Kovács T, Felföldi F, Papp B. All three splice variants of the human sarco/endoplasmic reticulum Ca²⁺-ATPase 3 gene are translated to proteins: a study of their co-expression in platelets and lymphoid cells. *Biochemical Journal*. 2001;358(3):559–568. DOI: 10.1042/0264-6021:3580559.
16. Bobe R, Bredoux R, Wuytack F. The rat platelet 97-kDa Ca²⁺ATPase isoform is the sarcoendoplasmic reticulum Ca²⁺ATPase 3 protein. *Journal of biological chemistry*. 1994;2:1417–1424.
17. López JJ, Jardín I, Bobe R. STIM1 regulates acidic Ca²⁺ store refilling by interaction with SERCA3 in human platelets. *Biochemical Pharmacology*. 2008;75(11):2157–2164. DOI: 10.1016/j.bcp.2008.03.010.
18. Oh-Hora M, Yamashita M, Hogan PG. Dual functions for the endoplasmic reticulum calcium sensors STIM1 and STIM2 in T cell activation and tolerance. *Nature Immunology*. 2008;9(4):432–443. DOI: 10.1038/ni1574.
19. Stathopoulos PB, Ikura M. Store operated calcium entry: From concept to structural mechanisms. *Cell Calcium*. 2017;63:3–7. DOI: 10.1016/j.ceca.2016.11.005.

References

1. Berridge MJ, Bootman MD, Roderick HL. Calcium signalling: dynamics, homeostasis and remodeling. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. 2003;7:517–529. DOI: 10.1038/nrm1155.
2. Martin V, Bredoux R, Corvazier E. Platelet Ca²⁺ATPases. *Hypertension*. 2000;35:91–102. DOI:10.1161/01.HYP.35.1.91.
3. Wuytack F, Papp B, Verboomen H. A sarcoendoplasmic reticulum Ca(2+)-ATPase 3-type Ca²⁺ pump is expressed in platelets, in lymphoid cells, and in mast cells. *Journal of Biological Chemistry*. 1994;2:1410–1416. DOI: 10.1016/S0021-9258(17)42273-3.
4. Dean WL. Role of platelet plasma membrane Ca²⁺-ATPase in health and disease. *World Journal of Biological Chemistry*. 2010;1(9):265–270. DOI:10.4331/wjbc.v1.i9.265.
5. Flaumenhaft R. SERCA navigating calcium signaling in platelets. *Blood*. 2016;128(8):1034–1035. DOI: 10.1182/blood-2016-07-723965.
6. Martin V, Bredoux R, Corvazier E. Three novel sarco/endoplasmic reticulum Ca²⁺-ATPase (SERCA) 3 isoforms. Expression, regulation, and function of the membranes of the SERCA3 family. *Journal of Biological Chemistry*. 2002;277(27):24442–24452. DOI: 10.1074/jbc.M202011200.
7. Varga-Szabo D, Braun A, Nieswandt B. Calcium signaling in platelets. *Journal of thrombosis and haemostasis*. 2009;7:1057–1066. DOI: 10.1111/j.1538-7836.2009.03455.x.
8. Berrocal M, Mata AM. The plasma membrane Ca²⁺-ATPase, a molecular target for Tau-induced cytosolic calcium dysregulation. *Neuroscience*. 2022. S0306-4522(22)00198-1. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2022.04.016.
9. Dean WL. Role of platelet plasma membrane Ca²⁺-ATPase in health and disease. *World Journal of Biological Chemistry*. 2010;1(9):265–270. DOI:10.4331/wjbc.v1.i9.265.
10. Feng M, Elaïb Z, Borgel D. NAADP/SERCA3-dependent Ca²⁺ stores pathway specifically controls early autocrine ADP secretion potentiating platelet activation. *Circulation Research*. 2020;127(7):166–183. DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.119.316090.
11. Redondo PC, Rosado JA, Pariente JA. Collaborative effect of SERCA and PMCA in cytosolic calcium homeostasis in human platelets. *Journal of Physiology and Biochemistry*. 2005;61:507–516. DOI: 10.1007/BF03168376.
12. Parkhimovich OG, Bichan OD, Bulanova KYa. Postluchevyye izmeneniya regulyatsii tsitoplazmatichesko kal'tsiya v trombotsitakh, aktivirovannykh ADF i trombinom [Post-radiation changes in the regulation of cytoplasmic calcium in platelets activated by ADP and thrombin]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Eksperimental'naya biologiya i biotekhnologiya*. 2023;1: 56–61. Russian.
13. Vasil'yeva YeF, Brusov OS. Trombotsity, gemostaz i psikhicheskiye rasstroystva. [Platelets, hemostasis and mental disorders]. *Zhurnal neurologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova*. 2019;119:103–108. Russian. DOI:10.17116/jnevro2019119111103.
14. Stafford N, Wilson C, Oceandy D. The plasma membrane calcium ATPases and their role as major new players in human disease. *Physiological Reviews*. 2017;97(3):1089–1125. DOI: 10.1152/physrev.00028.201.
15. Kovács T, Felföldi F, Papp B. All three splice variants of the human sarco/endoplasmic reticulum Ca²⁺-ATPase 3 gene are translated to proteins: a study of their co-expression in platelets and lymphoid cells. *Biochemical Journal*. 2001;358(3):559–568. DOI: 10.1042/0264-6021:3580559.
16. Bobe R, Bredoux R, Wuytack F. The rat platelet 97-kDa Ca²⁺ATPase isoform is the sarcoendoplasmic reticulum Ca²⁺ATPase 3 protein. *Journal of biological chemistry*. 1994;2:1417–1424.
17. López JJ, Jardín I, Bobe R. STIM1 regulates acidic Ca²⁺ store refilling by interaction with SERCA3 in human platelets. *Biochemical Pharmacology*. 2008;75(11):2157–2164. DOI: 10.1016/j.bcp.2008.03.010.
18. Oh-Hora M, Yamashita M, Hogan PG. Dual functions for the endoplasmic reticulum calcium sensors STIM1 and STIM2 in T cell activation and tolerance. *Nature Immunology*. 2008;9(4):432–443. DOI: 10.1038/ni1574.
19. Stathopoulos PB, Ikura M. Store operated calcium entry: From concept to structural mechanisms. *Cell Calcium*. 2017;63:3–7. DOI: 10.1016/j.ceca.2016.11.005.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 579.695

КОМПЛЕКСНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРЕДПРИЯТИЙ МЯСО-МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

М. С. ЧИРИКОВА¹⁾, Е. М. ГЛУШЕНЬ¹⁾, И. И. АЛЕШКЕВИЧ¹⁾, К. А. ГУБЧИК¹⁾

¹⁾Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Купревича, 2, 220141, г. Минск, Беларусь

В Республике Беларусь функционирует около 200 предприятий по производству мясной продукции и более 50 предприятий молочной промышленности. До 70 % используемой на данных производствах воды загрязняется жировыми веществами и белками. В настоящее время наибольшее распространение для очистки таких сточных вод получили физико-химические методы (коагуляция и флокуляция) и биологическая очистка с применением специализированных микроорганизмов-деструкторов загрязняющих веществ. Для достижения наилучших результатов при очистке сточных вод целесообразно использовать данные методы в совокупности. Большое внимание стало уделяться полной или частичной замене химических флокулянтов биологическими или микроорганизмами, обладающими

Образец цитирования:

Чирикова МС, Глушень ЕМ, Алешкевич ИИ, Губчик КА. Комплексная биологическая очистка сточных вод предприятий мясо-молочной промышленности. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;1:59–66. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-59-66>

For citation:

Chyrykava MS, Hlushen AM, Aliashkevich II, Hubchyk KA. Integrated biological wastewater treatment for meat and dairy industry. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;1:59–66. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-59-66>

Авторы:

Маргарита Сергеевна Чирикова – научный сотрудник лаборатории природоохранных биотехнологий.

Елена Михайловна Глушень – кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией природоохранных биотехнологий.

Ирина Ивановна Алешкевич – научный сотрудник лаборатории природоохранных биотехнологий.

Кирилл Александрович Губчик – научный сотрудник лаборатории природоохранных биотехнологий.

Authors:

Marharyta S. Chyrykava, researcher at the laboratory of environmental biotechnologies.

margarita.chirikova@mail.ru

Alena M. Hlushen, PhD (biology), docent, head of the laboratory of environmental biotechnologies.

gem@mbio.bas-net.by

Iryna I. Aliashkevich, researcher at the laboratory of environmental biotechnologies.

shuniborova@mail.ru

Kiryl A. Hubchyk, researcher at the laboratory of environmental biotechnologies.

gubchikk@gmail.com

флокулирующей способностью. В настоящей работе рассматривается процесс очистки сточных вод предприятий мясо-молочной промышленности с использованием консорциума микроорганизмов-флокулянтов и микробного препарата Антойл. Показано, что исследуемый микробный консорциум не уступает по активности наиболее распространенным синтетическим флокулянтам на основе полиакриламида, которые используются для очистки сточных вод. Флокулирующие активности составили 92–98 %. Установлено, что процесс очистки исследуемых сточных вод с помощью используемого консорциума микроорганизмов-флокулянтов зависит от температуры и значения pH стоков. Стоки молочной и мясной промышленности очищались с эффективностью 60,9–98,0 % за 7 суток в диапазоне температур 10–40 °C и pH 4–9. Показано, что применение консорциума микроорганизмов-флокулянтов позволяет достигнуть высоких показателей очистки сточных вод сыродельного комбината и птицефабрики не только по взвешенным веществам, но и по ХПК. Практически подтверждена эффективность совместного применения консорциума микроорганизмов-флокулянтов и микробного препарата Антойл для очистки сточных вод птицефабрик и поддержания эффективности очистки на высоком уровне (86,5–92,9 %) в период залповых сбросов.

Ключевые слова: микроорганизмы-деструкторы; флокулирующая активность; препарат Антойл; очистка сточных вод.

INTEGRATED BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT FOR MEAT AND DAIRY INDUSTRY

M. S. CHYRYKAVA^a, A. M. HLUSHEN^a, I. I. ALIASHKEVICH^a, K. A. HUBCHYK^a

^a*Institute of Microbiology National Academy of Sciences of Belarus,
2 Kuprevichya Sreet, Minsk 220141, Belarus
Corresponding author: M. S. Chyrykava (margarita.chirikova@mail.ru)*

About 200 enterprises producing meat product and more than 50 enterprises of the dairy industry operate in the Republic of Belarus. Up to 70 % of the water used in these industries is contaminated with fatty substances. At present, physicochemical methods (coagulation and flocculation) and biological treatment using microorganisms-destroyers of fats and oils are most widely used for the treatment of fat-containing wastewater, it is advisable to use these treatment methods in combination. Recently, more and more attention has been paid to the complete or partial replacement of chemical flocculants by biological or microorganisms with flocculating ability. In this paper, the process of wastewater treatment of meat and dairy industry enterprises was studied using a consortium of flocculant microorganisms and the microbial preparation Antoil. The investigated microbial consortium was shown to be as active as the most common polyacrylamide-based synthetic flocculants used for wastewater treatment. The flocculating activity was 92–98 %. It has been established that the process of purification of the studied wastewater with the help of the consortium of microorganisms used depends on the temperature and pH value of the effluents. Dairy and meat industry wastewater was treated with an efficiency of 60.9–98.0 % in 7 days in the temperature range of 10–40 °C and pH 4–9. It is shown that the use of a consortium of flocculant microorganisms makes it possible to achieve high rates of wastewater treatment of a cheese-making plant and a poultry farm not only in terms of suspended solids, but also in terms of COD. The effectiveness of the combined use of a consortium of flocculant microorganisms and the microbial preparation Antoil for the treatment of wastewater from poultry farms and maintaining the treatment efficiency at a high level (86.5–92.9 %) during burst discharges has been practically confirmed.

Keywords: microorganisms-destroyers; flocculating activity; Antoil; wastewater treatment.

Введение

Развитие промышленности наряду с бесконтрольным природопользованием сопровождается глобальными, порой необратимыми, нарушениями баланса естественных процессов в биосфере. В Республике Беларусь функционирует около 200 предприятий по производству мясной продукции и более 50 предприятий молочной промышленности. При этом до 70 % используемой на данных производствах воды загрязняется жировыми веществами и белками.

Неотъемлемой стадией очистки таких сточных вод в настоящее время являются методы реагентной физико-химической очистки, в частности коагуляция и флокуляция. В процессе коагуляции сточных вод утрачивается их седиментационная устойчивость, что позволяет далее с помощью флокулянтов осадить взвешенные и коллоидные загрязнения. Данные методы позволяют производить очистку сточных вод от загрязнений, различающихся как по химическому, так и по фазово-дисперсному составу [1; 2]. Однако использование химических флокулянтов (синтетические полимерные флокулянты) и коагулянтов (сульфат, оксихлорид и полиоксихлорид алюминия, алюминат натрия, сульфаты двух- и трехвалентного железа, а также хлорид железа) имеет существенные недостатки: тяжелые металлы и токсичные мономеры

переходят в осадок, тем самым ограничивая его пригодность для дальнейшего использования; обработка коагулянтами приводит к значительному снижению pH воды, что усиливает коррозию оборудования [3].

В связи с этим актуальной является разработка таких реагентных методов, которые включали бы преимущественно физико-химической очистки при отсутствии недостатков использования химических реагентов. В последнее время все больше внимания стало уделяться использованию флокулянтов биологического происхождения или микроорганизмов, обладающих флокулирующей способностью [4]. Процесс биофлокуляции возможен за счет взаимодействия веществ как непосредственно с клеточной поверхностью микроорганизмов, так и с продуктами их метаболизма. Эффективность связывания соединений зависит от вида микроорганизма, структуры клеточной поверхности или структуры биофлокулянта, синтезируемого микроорганизмом, а также природы флокулируемой фазы [5].

Анализ литературы показал, что эффективность применения микробных флокулянтов для очистки пищевых сточных вод составляет 85–98 % и соответствует уровню эффективности очистки с использованием химических флокулянтов, при этом не образуется вторичного загрязнения окружающей среды. Изучена возможность очистки с помощью микробных флокулянтов сточных вод пивоваренного производства [6], молочных стоков [7; 8], коммунально-бытовых [9; 10], речных вод вблизи пищевых предприятий [11; 12], сточных вод рыбоперерабатывающих производств [13], стоков птицефабрик [14].

Еще одним распространенным методом очистки сточных вод мясо-молочной промышленности является биологическая очистка с применением специализированных микроорганизмов, способных использовать в качестве питательных веществ загрязнения, содержащиеся в сточных водах [15; 16]. Микроорганизмы в таких сооружениях находятся либо в свободном, либо в иммобилизованном состоянии [17–19]¹. Преимущества биологической очистки сточных вод с помощью микроорганизмов-деструкторов следующие: широкий спектр удаляемых загрязнений, отсутствие вторичного загрязнения воды более экономичны, так как требуют незначительных расходов во время эксплуатации биологических очистных сооружений. Однако применение биологического метода требует строгого соблюдения таких параметров, как температура и значение pH сточных вод, а также концентрация растворенного кислорода в аэротенках [20]. Несмотря на вышеперечисленные строгие требования биологический метод является обязательной стадией процесса очистки сточных вод, при котором происходит практически полное биологическое разложение органических соединений в воде.

Таким образом, для достижения наилучших результатов при удалении загрязнений из сточных вод мясо-молочной промышленности целесообразно использовать физико-химические и биологические методы очистки в совокупности.

Ранее в Институте микробиологии НАН Беларуси разработан микробный препарат Антойл и технология его применения для очистки коммунально-бытовых сточных вод, осложненных высоким содержанием жировых веществ [21]. Также получен консорциум микроорганизмов, обладающих высокой деструктивной активностью и флокулирующей способностью по отношению к гидрофобным загрязнениям сточных вод [22].

Цель исследования – изучение процесса очистки сточных вод предприятий мясо-молочной промышленности при совместном применении консорциума микроорганизмов-флокулянтов и микробного препарата Антойл.

Материалы и методы исследования

Эффективность очистки сточных вод предприятий мясной и молочной промышленности консорциумом микроорганизмов-флокулянтов проводили в лабораторной модельной установке биологической очистки сточных вод. Смешивали иловую суспензию и сточные воды в соотношении 2 : 8. Доза микробного консорциума – 0,5 %. Условия проведения процесса: рабочий объем модельного аэротенка 10 л, температура – 20–22 °С, скорость протока – 20 л/сутки. В исследовании были использованы сточные воды ОАО «Березовский сыродельный комбинат» (взвешенные вещества – 450 мг/л, химическое потребление кислорода (ХПК) – 6460 мгО₂/л, pH 5,3) и сточные воды ОАО «Витебская бройлерная птицефабрика» (взвешенные вещества – 380 мг/л, ХПК – 4830 мгО₂/л, pH 6,5). За процессом очистки наблюдали в течение 14 суток. Контролируемым показателем являлось химическое потребление кислорода (ХПК), которое определяли фотометрически с использованием анализатора «Эксперт-003-ХПК» по ГОСТ 31859-2012, и взвешенные вещества².

Отработку технологии совместного применения консорциума микроорганизмов-флокулянтов и микробного препарата Антойл проводили на очистных сооружениях птицефабрики РУП «Белоруснефть-Особино». Нарботку препарата Антойл осуществляли в условиях научно-производственного центра биотехнологий

¹Самсонова А. С., Алепченкова З. М., Семочкина Н. Ф., Петрова Г. М., Толстолуцкая Л. И., Холодинская Н. В., Крук Н. И., Авсеев А. Е. Способ очистки коммунальных сточных вод от жировых веществ: патент ВУ 10605. Опубл. 30.06.2008.

²ГОСТ 31859-2012. Вода. Метод определения химического потребления кислорода. Москва: Стандартинформ, 2014. 11 с.

Института микробиологии НАН Беларуси. Контролируемыми показателями являлись ХПК, биохимическое потребление кислорода (БПК₅), а также взвешенные вещества. Контроль процесса очистки осуществляли ежемесячно. Данные по очистке предоставлены лабораторией РУП «Белоруснефть-Особоино».

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенная сравнительная оценка флокулирующей активности по отношению к каолиновой суспензии полученного ранее консорциума микроорганизмов-флокулянтов и синтетических флокулянтов показала, что их активности находились уровне 92–98 %. Таким образом, полученный консорциум не уступает по активности наиболее распространенным синтетическим флокулянтам на основе полиакриламида, которые используются для очистки сточных вод.

При изучении возможности применения биофлокулянтов для очистки сточных вод важным этапом является проверка их действия на нативных сточных водах, так как состав стоков различных производств сильно отличается друг от друга. Биофлокулянты, синтезируемые микроорганизмами, различаются по своей химической структуре, и механизм флокуляции сточных вод может значительно отличаться от процесса флокуляции каолиновой суспензии, которая наиболее часто используется в качестве тест-системы. В связи с вышесказанным на следующем этапе была изучена эффективность применения синтетических флокулянтов и консорциума микроорганизмов-флокулянтов для очистки производственных сточных вод ОАО «Березовский сыродельный комбинат» и ОАО «Витебская бройлерная птицефабрика» в модельных условиях.

Установлено, что эффективность очистки по ХПК сточных вод сыродельного комбината с помощью консорциума микроорганизмов-флокулянтов через 7 суток составила 72 %, а через 14 суток – 91 %. Содержание взвешенных веществ снизилось на 78 % уже на 2 сутки. При изучении эффективности очистки сточных вод птицефабрики наблюдалась такая же тенденция. Через 7 суток степень очистки по ХПК с помощью консорциума микроорганизмов составила 83 %, а через 14 суток – 95 %. Количество взвешенных веществ на 2 сутки наблюдения снизилось на 81 %.

Использование синтетических флокулянтов на основе полиакриламида (Extraflock P170, Praestol 2500) привело к снижению содержания взвешенных веществ на 2 сутки на 85–89 %. Эффективность очистки по ХПК составила на 7 сутки 50,4–67,2 %, что на 4,8–6,4 % (для стоков сыродельного комбината) и 23,9–32,6 % (для стоков птицефабрики) ниже эффективности очистки с помощью консорциума микроорганизмов-флокулянтов.

Таким образом, использование полученного консорциума микроорганизмов-флокулянтов позволяет достигнуть высоких показателей очистки сточных вод сыродельного комбината и птицефабрики не только по взвешенным веществам, но и по ХПК.

Известно, что важными факторами, влияющими на процесс очистки сточных вод с помощью микроорганизмов, являются температура и значение pH. В связи с этим изучен в модельных условиях процесс очистки сточных вод ОАО «Березовский сыродельный комбинат» и ОАО «Витебская бройлерная птицефабрика» с помощью полученного консорциума микроорганизмов-флокулянтов в диапазоне температур от 5 до 40 °С и pH от 1 до 10. Установлено, что исследуемые стоки очищались с эффективностью 60,9–98 % за 7 суток в широком диапазоне температур 10–40 °С и pH 4–9 (табл. 1, 2).

Таблица 1

Эффективность очистки (%) сточных вод сыродельного комбината по ХПК

Table 1

Efficiency of treatment (%) of wastewater from a cheese-making plant in terms of COD

Значение pH	Температура, °С				
	5	10	20	30	40
1,0	5,7 ± 1,5	8,2 ± 2,2	7,1 ± 3,2	9,2 ± 0,9	13,3 ± 4,1
2,0	18,0 ± 3,2	23,0 ± 1,6	21,8 ± 2,6	14,0 ± 1,6	31,7 ± 3,0
3,0	28,1 ± 3,6	41,0 ± 4,4	32,2 ± 3,8	28,1 ± 2,2	36,0 ± 2,9
4,0	25,1 ± 4,8	39,4 ± 4,9	51,9 ± 6,4	54,8 ± 5,4	46,4 ± 4,1
5,0	30,2 ± 5,2	66,2 ± 5,3	73,6 ± 5,6	75,5 ± 3,4	62,8 ± 6,8
6,0	32,8 ± 5,6	68,7 ± 5,5	72,0 ± 5,9	75,2 ± 5,8	63,1 ± 5,7
7,0	34,8 ± 6,0	71,4 ± 5,0	75,4 ± 6,2	78,0 ± 6,9	68,0 ± 5,6
8,0	36,9 ± 5,1	64,4 ± 6,7	73,0 ± 6,3	77,3 ± 4,7	60,9 ± 5,9
9,0	24,0 ± 3,2	42,9 ± 3,5	58,2 ± 2,4	62,5 ± 5,1	56,7 ± 6,1
10,0	11,2 ± 1,1	32,7 ± 4,7	41,1 ± 3,1	50,0 ± 3,2	32,0 ± 3,4
11,0	3,5 ± 1,6	25,1 ± 2,6	18,0 ± 3,0	26,1 ± 2,2	17,4 ± 2,1

Таблица 2

Эффективность очистки (%) сточных вод птицефабрики по ХПК

Table 2

Efficiency of treatment (%) of wastewater from a poultry farm in terms of COD

Значение рН	Температура, °С				
	5	10	20	30	40
1,0	11,5 ± 5,3	18,0 ± 2,9	19,1 ± 3,3	24,9 ± 3,8	20,1 ± 6,0
2,0	19,0 ± 2,9	27,1 ± 6,5	35,8 ± 5,7	47,1 ± 6,5	41,1 ± 3,4
3,0	29,6 ± 3,5	43,5 ± 3,4	52,6 ± 4,2	54,9 ± 4,7	57,8 ± 7,1
4,0	37,6 ± 6,1	69,8 ± 6,9	76,2 ± 5,6	82,4 ± 4,3	73,5 ± 5,9
5,0	45,8 ± 4,2	77,9 ± 7,0	88,4 ± 6,1	91,1 ± 5,9	84,4 ± 4,6
6,0	51,7 ± 8,8	78,2 ± 5,4	85,3 ± 2,8	93,3 ± 6,8	82,5 ± 8,5
7,0	52,8 ± 6,9	76,4 ± 4,2	86,9 ± 6,9	98,0 ± 4,7	86,1 ± 3,6
8,0	49,3 ± 5,7	77,0 ± 5,1	81,2 ± 5,4	90,2 ± 4,8	80,1 ± 6,9
9,0	36,2 ± 5,0	68,2 ± 1,6	70,0 ± 6,6	68,2 ± 5,3	59,1 ± 7,4
10,0	19,7 ± 3,6	45,7 ± 4,3	53,1 ± 5,7	41,1 ± 4,2	42,0 ± 7,2
11,0	9,6 ± 4,8	29,1 ± 2,5	26,0 ± 2,5	21,0 ± 6,7	16,4 ± 5,0

Производственные испытания очистки сточных вод проводились в рамках научно-исследовательской и опытно-технологической работы на очистных сооружениях одной из птицефабрик Витебской обл. Высокие концентрации жиров и взвешенных веществ в сточных водах предприятия приводили к снижению деструктивного потенциала активного ила, его вспуханию, что вызывало ряд сложностей при очистке, а также проблемы в эксплуатации очистных сооружений после жируловителя. В связи с этим для очистки данных стоков использовали консорциум микроорганизмов-флокулянтов, а также микробный препарат Антойл, предназначенный для интенсификации очистки сточных вод от жировых веществ. Консорциум микроорганизмов-флокулянтов вносили в усреднитель сточных вод, а микробный препарат Антойл – в аэротенк. Совмещение напорной флотации с применением микробного консорциума позволило добиться высокой степени очистки при значительном снижении количества химических реагентов и при более низком давлении во флотаторе. Эффективность очистки во флотаторе достигала 90–97 % по сравнению с 80–92 % с используемым ранее на предприятии режиме флотации. Применение микроорганизмов-деструкторов жировых веществ в составе микробного препарата Антойл повысило окислительную мощность активного ила. Через 2 недели после внесения отмечено увеличение степени очистки сточных вод по ХПК на 17 %.

Технология совместного применения консорциума микроорганизмов-флокулянтов и микробного препарата Антойл отработана на очистных сооружениях птицефабрики РУП «Белоруснефть-Особино». Основными проблемами на предприятии являлись плохое удаление взвешенных веществ, а также вспухание активного ила и его вынос из вторичных отстойников при запуске убойного цеха. Как следствие, увеличение материальных затрат на дополнительную очистку.

Контролируемыми показателями являлись ХПК, БПК₅, а также взвешенные вещества. Характеристика сточных вод, поступающих на очистку, представлена в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика сточных вод по контролируемым показателям

Table 3

Characteristics of wastewater by controlled indicators

Показатель	Количество, мг/дм ³	
	Режим работы очистных	
	штатный	залповые сбросы при работе убойного цеха
ХПК	181–266	505–616
БПК ₅	50–78	199–213
Взвешенные вещества	63–93	97–117

Консорциум микроорганизмов-флокулянтов и микробный препарат Антойл вносили непосредственно в аэротенки. Первоначально внесение осуществляли дискретно с интервалом в три недели, затем каждые шесть месяцев вносилась поддерживающая доза. Анализ контролируемых показателей очистки до внесения микробной загрузки и в течение года после первого внесения показал увеличение степени очистки по ХПК на 5,8–15,4 %, по БПК₅ – на 5,3–9,2 %. Отмечено снижение показателя илового индекса с 172 см³/г до 134 см³/г. На протяжении всего периода исследований наблюдалось постепенное восстановление биоценоза активного ила, снижение количества нитчатых прокариот, а следовательно, улучшение седиментационных свойств и уменьшение выноса ила из вторичных отстойников.

Наиболее показательными являются результаты при внесении поддерживающей дозы консорциума микроорганизмов-флокулянтов и препарата Антойл перед запуском убойного цеха с целью снижения нагрузки на активный ил при залповом сбросе. Мониторинг процесса очистки сточных вод до и после внесения показал увеличение степени очистки по основным контролируемым показателям на 10,6–16,9 %, несмотря на то что показатели ХПК, БПК₅ и взвешенных веществ поступающей на очистку сточной воды в 1,4–3,9 раз были выше чем до запуска убойного цеха (табл. 4). На протяжении последующих трех месяцев после внесения эффективность очистки по вышеперечисленным показателям находилась на уровне 86,5–92,9 %. Улучшение деструктивного потенциала активного ила способствовало эффективной очистке стоков и предотвращению нитчатого вспухания ила.

Таблица 4

Эффективность очистки сточных вод птицефабрики

Table 4

Poultry farm wastewater treatment efficiency

Период контроля	Эффективность очистки, %		
	ХПК	БПК ₅	Взвешенные вещества
До внесения (среднее за 6 месяцев)	79,5	75,8	74,6
После внесения (среднее за 3 месяца)	90,1	92,7	86,9
Увеличение степени очистки	+10,6	+16,9	+12,3

Заключение

Таким образом, полученные результаты подтверждают эффективность совместного применения консорциума микроорганизмов-флокулянтов и микробного препарата Антойл для очистки сточных вод птицефабрик и поддержания эффективности очистки на высоком уровне в период залповых сбросов.

Установлено, что применение консорциума микроорганизмов-флокулянтов позволяет достигнуть высоких показателей очистки сточных вод сыродельного комбината и птицефабрики не только по взвешенным веществам, но и по ХПК. Практически подтверждена возможность совместного применения консорциума микроорганизмов-флокулянтов и микробного препарата Антойл для очистки сточных вод птицефабрик, а также создания новых технологий очистки сточных вод предприятий мясо-молочной промышленности.

Библиографические ссылки

1. Lee CS, Robinson J, Chong MF. A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014;92(6):489–508. DOI: 10.1016/j.psep.2014.04.010.
2. Yang Q, Zhao X, Zhang J. Components of a bioflocculant for treating tannery wastewater. *Journal Residuals Science and Technology*. 2015;12(2):99–103. DOI: 10.12783/issn.1544-8053/12/2/9.
3. Okaiyeto K, Nwodo UU, Okoli SA. Implications for public health demands alternatives to inorganic and synthetic flocculants: bioflocculants as important candidates. *Microbiology Open*. 2016;5(2):177–211. DOI: 10.1002/mbo3.334.
4. Abdullah AM, Hamidah H, Alam MZ. Research progress in bioflocculants from bacteria. *International Food Research Journal*. 2014;24:402–409. URL: [http://www.ifrj.upm.edu.my/24%20\(07\)%](http://www.ifrj.upm.edu.my/24%20(07)%).
5. Liu P, Chen Z, Yang L. Increasing the bioflocculant production and identifying the effect of overexpressing epsB on the synthesis of polysaccharide and γ -PGA in *Bacillus licheniformis*. *Microbial Cell Factories*. 2017;16(1):163–172. DOI: 10.1186/s12934-017-0775-9.
6. Cosa S, Okoh A. Bioflocculant production by a consortium of two bacterial species and its potential application in industrial wastewater and river water treatment. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2014;23(3):689–696.
7. Шараева АА, Мефтахов РМ, Петухова НИ. Исследование флокулирующей активности экзополимеров микроорганизмов нефтеокисляющих биоценозов. *Нефтегазовое дело*. 2013;1:510–519.
8. Ugbenyen A, Okoh A. Characteristics of a bioflocculant produced by a consortium of *Cobetia* and *Bacillus* species and its application in the treatment of wastewaters. *Water SA*. 2014;40(1):139–144. DOI: 10.4314/wsa.v40i1.17.

9. Ding R, Laipeng L, Han R. Rapid Production of a novel Al(III) dependent biofloculant isolated from *Raoultella ornithinolytica* 160-1 and its application combined with inorganic salts. *Frontiers in Microbiology*. 2021;11:62–73. DOI: 10.3389/fmicb.2020.622365.
10. Hassimi AH, Hafiz RE, Muhamad MH. Biofloculant production using palm oil mill and sago mill effluent as a fermentation feedstock: characterization and mechanism of flocculation. *Journal of Environmental Management*. 2020;260:110–117. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.110046.
11. Kurniawan SB, Abdullah SR, Imron MF. Challenges and opportunities of biocoagulant/biofloculant application for drinking water and wastewater treatment and its potential for sludge recovery. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(24):9312–9344. DOI: 10.3390/ijerph17249312.
12. Humudat YR, Al-Naseri SK, Kadhim SA. Production of highly efficient bacterial flocculant in water treatment. *International Journal of Advanced Research*. 2014;2(9):297–301.
13. Цесь ЮВ, Васильева ЖВ. Разработка технологии очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий с помощью биофлокулянтов. *Научный журнал НИУ ИТМО*. 2014;1:16–21.
14. Dlangamandla C, Ntwampe SK, Basitere M. A biofloculant-supported dissolved air flotation system for the removal of suspended solids, lipids and protein matter from poultry slaughterhouse wastewater. *Water Science Technology*. 2018;78(2):452–458. DOI: 10.2166/wst.2018.324.
15. Lauprasert P, Chansirirattana J, Paengjan J. Effect of selected bacteria as bioremediation on the degradation of fats oils and greases in wastewater from cafeteria grease traps. *European Journal of Sustainable Development*. 2017;6(2):181–186. DOI: 10.14207/ejsd.2017.v6n2p181.
16. Tzirita M, Papanicolaou S, Chatzifragkou A. Waste fat biodegradation and biomodification by *Yarrowia lipolytica* and a bacterial consortium composed of *Bacillus* spp. and *Pseudomonas putida*. *Engineering in Life Sciences*. 2018;18(12):932–942. DOI: 10.1002/elsc.201800067.
17. Matran RM, Blaga AK, Cascaval D. Comparative studies on kinetics of anaerobic and aerobic biodegradation of lipids from olive oil mill wastewaters with mixture of *Bacillus* spp. cells. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2015;14(3):575–579. DOI: 10.30638/eemj.2015.062.
18. Deng J, Chen Q, Hu B. Synergic effect of adsorption and biodegradation by microsphere immobilizing *Bacillus velezensis* for enhanced removal organics in slaughter wastewater. *Processes*. 2021;9(7):1145–1155. DOI:10.3390/pr9071145.
19. Agualimpia B, Otero JV, Zafra G. Evaluation of native microorganisms for biodegradation of oil and grease in palm oil refinery effluents. *Biotechnologia Aplicada*. 2016;33:1221–1226.
20. Ручай НС, Маркевич РМ. *Экологическая биотехнология*. Минск: БГТУ; 2006. 312 с.
21. Чирикова МС, Глушень ЕМ, Самсонова АС. Биоинтенсификация очистки коммунально-бытовых сточных вод, осложненных высоким содержанием жировых веществ. *Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты*. 2019;11:560–570.
22. Чирикова МС, Глушень ЕМ. Флокулирующий и деструктивный потенциал нового микробного консорциума для очистки сточных вод предприятий молочной и мясopерерабатывающей промышленности. *Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты*. 2018;10:486–494.

References

1. Lee CS, Robinson J, Chong MF. A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014;92(6):489–508. DOI: 10.1016/j.psep.2014.04.010.
2. Yang Q, Zhao X, Zhang J. Components of a biofloculant for treating tannery wastewater. *Journal Residuals Science and Technology*. 2015;12(2):99–103. DOI: 10.12783/issn.1544-8053/12/2/9.
3. Okaiyeto K, Nwodo UU, Okoli SA. Implications for public health demands alternatives to inorganic and synthetic flocculants: biofloculants as important candidates. *Microbiology Open*. 2016;5(2):177–211. DOI: 10.1002/mbo3.334.
4. Abdullah AM, Hamidah H, Alam MZ. Research progress in biofloculants from bacteria. *International Food Research Journal*. 2014;24:402–409. URL: [http://www.ifrj.upm.edu.my/24%20\(07\)%](http://www.ifrj.upm.edu.my/24%20(07)%).
5. Liu P, Chen Z, Yang L. Increasing the biofloculant production and identifying the effect of overexpressing epsB on the synthesis of polysaccharide and γ -PGA in *Bacillus licheniformis*. *Microbial Cell Factories*. 2017;16(1):163–172. DOI: 10.1186/s12934-017-0775-9.
6. Cosa S, Okoh A. Biofloculant production by a consortium of two bacterial species and its potential application in industrial wastewater and river water treatment. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2014;23(3):689–696.
7. Sharaeva AA, Meftakhov RM, Petukhova NI. *Issledovanie flokuliruyushchei aktivnosti ekzopolimerov mikroorganizmov nefteokislyayushchikh biotsenozov* [Investigation of the flocculating activity of exopolymers of microorganisms of oil-oxidizing biocenoses]. *Neftegazovoe delo*. 2013;1:510–519. Russian.
8. Ugbenyen A, Okoh A. Characteristics of a biofloculant produced by a consortium of *Cobetia* and *Bacillus* species and its application in the treatment of wastewaters. *Water SA*. 2014;40(1):139–144. DOI: 10.4314/wsa.v40i1.17.
9. Ding R, Laipeng L, Han R. Rapid Production of a novel Al(III) dependent biofloculant isolated from *Raoultella ornithinolytica* 160-1 and its application combined with inorganic salts. *Frontiers in Microbiology*. 2021;11:62–73. DOI: 10.3389/fmicb.2020.622365.
10. Hassimi AH, Hafiz RE, Muhamad MH. Biofloculant production using palm oil mill and sago mill effluent as a fermentation feedstock: characterization and mechanism of flocculation. *Journal of Environmental Management*. 2020;260:110–117. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.110046.
11. Kurniawan SB, Abdullah SR, Imron MF. Challenges and opportunities of biocoagulant/biofloculant application for drinking water and wastewater treatment and its potential for sludge recovery. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(24):9312–9344. DOI: 10.3390/ijerph17249312.
12. Humudat YR, Al-Naseri SK, Kadhim SA. Production of highly efficient bacterial flocculant in water treatment. *International Journal of Advanced Research*. 2014;2(9):297–301.
13. Tses' YuV, Vasil'eva ZhV. *Razrabotka tekhnologii ochistki stochnykh vod rybopерерабатыvayushchikh predpriyatii s pomoshch'yu biofloкулянтов* [Development of wastewater treatment technology for fish processing enterprises using biofloculants]. *Nauchnyi zhurnal NIU ИТМО*. 2014;1:16–21. Russian.

14. Dlangamandla C, Ntwampe SK, Basitere M. A bioflocculant-supported dissolved air flotation system for the removal of suspended solids, lipids and protein matter from poultry slaughterhouse wastewater. *Water Science Technology*. 2018;78(2):452–458. DOI: 10.2166/wst.2018.324.

15. Lauprasert P, Chansirirattana J, Paengjan J. Effect of selected bacteria as bioremediation on the degradation of fats oils and greases in wastewater from cafeteria grease traps. *European Journal of Sustainable Development*. 2017;6(2):181–186. DOI: 10.14207/ejsd.2017.v6n2p181.

16. Tzirita M, Papanicolaou S, Chatzifragkou A. Waste fat biodegradation and biomodification by *Yarrowia lipolytica* and a bacterial consortium composed of *Bacillus* spp. and *Pseudomonas putida*. *Engineering in Life Sciences*. 2018;18(12):932–942. DOI: 10.1002/elsc.201800067.

17. Matran RM, Blaga AK, Cascaval D. Comparative studies on kinetics of anaerobic and aerobic biodegradation of lipids from olive oil mill wastewaters with mixture of *Bacillus* spp. cells. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2015;14(3):575–579. DOI: 10.30638/eemj.2015.062.

18. Deng J, Chen Q, Hu B. Synergic effect of adsorption and biodegradation by microsphere immobilizing *Bacillus velezensis* for enhanced removal organics in slaughter wastewater. *Processes*. 2021;9(7):1145–1155. DOI:10.3390/pr9071145.

19. Agualimpia B, Otero JV, Zafra G. Evaluation of native microorganisms for biodegradation of oil and grease in palm oil refinery effluents. *Biotechnologia Aplicada*. 2016;33:1221–1226.

20. Ruchai NS, Markevich RM. *Ekologicheskaya biotekhnologiya* [Ecological biotechnology] Minsk: BSTU;2006. Russian.

21. Chirikova MS, Glushen' EM, Samsonova AS. *Biointensifikatsiya ochistki kommunal'no-bytovykh stochnykh vod, oslozhnennykh vysokim soderzhaniem zhirovykh veshchestv* [Biointensification of municipal wastewater treatment, complicated by a high content of fatty substances]. *Mikrobnye biotekhnologii: fundamental'nye i prikladnye aspekty*. 2019;11:560–570. Russian.

22. Chirikova MS, Glushen' EM. *Flokuliruyushchii i destruktivnyi potentsial novogo mikrobnogo konsortsiuma dlya ochistki stochnykh vod predpriyatii molochnoi i myasopererabatyvayushchei promyshlennosti* [Flocculating and destructive potential of a new microbial consortium for wastewater treatment of dairy and meat processing industries]. *Mikrobnye biotekhnologii: fundamental'nye i prikladnye aspekty*. 2018;10:486–494. Russian.

Статья поступила в редакцию 22.12.2022.

Received by editorial board 22.12.2022.

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ СВЯЗАННЫХ С ВОДОЙ ЭКОСИСТЕМ: НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД

О. М. ТАВРЫКИНА¹⁾, С. А. ДУБЕНОК²⁾, Е. И. ГРОМАДСКАЯ¹⁾,
Е. А. ИВАШКО¹⁾, А. З. МАКУСЬ¹⁾, Д. А. ШПАКОВА¹⁾

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

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

Показатель ЦУР 6.6.1 «Динамика изменения площади связанных с водой экосистем» призван для защиты целостности экологических функций и сохранения биоразнообразия связанных с пресной водой экосистем – озер, водохранилищ, рек, водно-болотных угодий и т. д. Разработка национальной методики по оценке динамики изменения площади связанных с водой экосистем обусловлена необходимостью формирования данных по показателю в рамках международных подходов, создания единой базы данных для принятия управленческих решений по сохранению пресной воды и сообщества растений, животных и микроорганизмов, взаимодействующих с ней. На основании концепции международной методики с учетом национальных особенностей разработан проект национальной методики для расчета прокси-показателя 6.6.1.1 «Динамика изменения площади поверхностных водных объектов», который формируется путем сравнения данных о площади озер, водохранилищ и рек базового периода с последующим целевым пятилетним периодом. На основе сравнения базового и целевого периодов производится расчет процентного изменения пространственной протяженности. Для расчета процентного изменения пространственной протяженности используются данные о площадях озер, водохранилищ и рек включенных в Реестр поверхностных водных объектов Республики Беларусь, данные геопортала о видах земель, результаты паспортизации, картографические расчеты на основе ГИС, ЗИС и собственной аэрофотосъемки БПЛА. Проведен расчет изменения площади поверхности воды для озер, водохранилищ, рек. Показано, что в исследуемый период (2018–2022 гг.) по сравнению с предыдущим (2008–2012 гг.) площадь поверхность воды озер (общим количеством 2041), водохранилищ (общим количеством 84), рек (общим количеством 19) сократилась соответственно на 7,83 км² или 0,63 %, 2,03 км² или 0,31 %, 2,15 км² или 0,27 %. Данные, полученные в соответствии с разработанной методикой, будут формироваться за пятилетний период, начиная с 2023 г.

Ключевые слова: площадь поверхности воды; динамика изменения площади; связанные с водой экосистемы; показатель ЦУР 6.6.1; национальные подходы; озеро; водохранилище; река.

Образец цитирования:

Таврыкина ОМ, Дубенок СА, Громадская ЕИ, Ивашко ЕА, Макусь АЗ, Шпакова ДА. Оценка динамики изменения площади связанных с водой экосистем: национальный подход. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;1:67–80.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-67-80>

For citation:

Tavrykina OM, Dubianok SA, Gromadskaya EI, Ivashko EA, Makus AZ, Shpakova DA. Assessment of the dynamics of changes in the area of water-related ecosystems: national approach. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;1:67–80. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-67-80>

Авторы:

Оксана Михайловна Таврыкина – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, начальник отдела гидрологии и водоохраных территорий.

Снежана Анатольевна Дубенок – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение».

Елена Ивановна Громадская – начальник отдела поверхностных вод.

Егор Александрович Ивашко – младший научный сотрудник отдела гидрологии и водоохраных территорий.

Антон Здиславович Макусь – младший научный сотрудник отдела гидрологии и водоохраных территорий.

Дарья Александровна Шпакова – младший научный сотрудник сектора экологического аудита в области использования и охраны вод.

Authors:

Oksana M. Tavrykina, PhD (agriculture), docent, head of the department of hydrology and water protection areas.

tavrykina@cricuwr.by

Sniazhana A. Dubianok, PhD (engineering), docent, associate professor at the department «Water supply and sanitation».

dsnega@list.ru

Elena I. Gromadskaya, head of the department of hydrology and water protection areas.

grei@cricuwr.by

Egor A. Ivashko, junior researcher at the department of hydrology and water protection areas.

ivashkoegal@gmail.com

Anton Z. Makus, junior researcher at the department of hydrology and water protection areas.

makus214a@gmail.com

Dar'ya A. Shpakova, junior researcher at the department of environmental audit.

daria.shpakova.01@mail.ru

ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE AREA OF WATER-RELATED ECOSYSTEMS: NATIONAL APPROACHES

O. M. TAVRYKINA^a, S. A. DUBIANOK^b, E. I. GROMADSKAYA^a,
E. A. IVASHKO^a, A. Z. MAKUS^a, D. A. SHPAKOVA^a

^aCentral Research Institute for Complex Use of Water Resources,
1 Slavinskaya Street, 2 building, Minsk 220086, Belarus

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

Corresponding author: O. M. Tavrykina (tavrykina@cricuwr.by)

SDG indicator 6.6.1 «Change in the extent of water-related ecosystems over time» is designed to protect the integrity of ecological functions and preserve the biodiversity of water-related ecosystems – lakes, reservoirs, rivers, flooded wetlands, etc. The development of a national methodology for assessing the dynamics of changes in the area of water-related ecosystems is due to the need to generate data on the indicator within the framework of international approaches, to create a single database for making management decisions on the conservation of fresh water and the communities of plants, animals and microorganisms interacting with it. According to the concept of the international methodology, taking into account national characteristics, a project of national methodology was developed to calculate the proxy indicator 6.6.1.1 «Dynamics of changes in the area of surface water bodies», which is formed by comparing data on the area of lakes, reservoirs and rivers of the base period with the subsequent target five-year period. Based on the comparison of the base and target periods, the percentage change in spatial extent is calculated. To calculate the percentage change in spatial extent, data on the areas of lakes, reservoirs and rivers included in the Register of Surface Water Bodies of the Republic of Belarus, geoportal data on land types, certification results, cartographic calculations based on GIS, VIS and UAV own aerial photography are used. The calculation of changes in the water surface area for lakes, reservoirs, rivers was carried out. It is shown that in the study period (2018–2022), compared with the previous one (2008–2012), the water surface area of lakes (total number 2041), reservoirs (total number 84), rivers (total number 19) decreased respectively by 7,83 km² or 0,63 %, 2,03 km² or 0,31 %, 2,15 km² or 0,27 %. Data, in accordance with the developed methodology, will be generated for a five-year period starting from 2023.

Keywords: water surface area; area dynamics; water-related ecosystems; SDG indicator 6.6.1; national approaches; lake; reservoir; river.

Введение

Методика мониторинга достижения ЦУР по показателю 6.6.1 «Динамика изменения площади связанных с водой экосистем» разработана официальным курирующим этот показатель учреждением – Программой Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) в 2016 г.¹

Цель показателя заключается в формировании и оценке динамики изменения площади, занимаемой связанными с водой экосистемами, а также количестве и качестве содержащейся в них воды.

Мониторинг показателя 6.6.1 ориентирован на оценку и прогноз обеспечения целостности связанных с водой экосистем и их экологических функций, в том числе сохранения видового биоразнообразия, поскольку связанные с водой экосистемы входят в число наиболее разнообразных в биологическом отношении сред, в которых обитают около 10 % всех известных в мире видов. Водные экосистемы способствуют поддержанию глобального гидрологического цикла, углеродного цикла и круговорота питательных веществ, что обязывает охранять этот ресурс, а также средства обеспечения пресной водой для общества и планеты.

Для реализации поставленной задачи и оценки прогресса ее достижения на международном уровне предложены подходы к оценке динамики изменения площади связанных с водой экосистем и индикаторы, оценивающие успешность реализации поставленной задачи. Показатель предусматривает отслеживание долгосрочных тенденций изменения площади экосистем в сравнении с предыдущим периодом исследования, степень ее изменения с течением времени (в %). Ряды данных о различных видах связанных с водой экосистем доступны в разных пространственных масштабах, включая национальный, субнациональный и масштаб речного бассейна.

В соответствии с международными подходами к оценке пошаговой реализации задачи 6.6 ЦУР, 6 стран, начиная с 2017 г., каждые пять лет предоставляют национальную отчетность по прогрессу в достижении реализации задачи 6.6 – «К 2030 году защитить и восстановить связанные с водой экосистемы,

¹Измерение динамики изменения площади связанных с водой экосистем // Методика мониторинга достижения целей в области устойчивого развития. Показатель 6.6.1 [Электронный ресурс]. ООН – Окружающая среда. URL: https://www.unwater.org/app/uploads/2020/04/SDG-indicator-661-methodology_Russian.pdf (дата обращения: 01.09.2022).

включая горы, леса, водно-болотные угодья, реки, водоносные горизонты и озера». Показатель 6.6.1 является единственным источником для измерения прогресса в достижении целевой задачи 6.6 [1].

Прогрессивный подход к мониторингу дает возможность для стран извлекать пользу из результатов обработки глобальных данных о связанных с водой экосистемах, оценивать изменения площади поверхности воды естественных постоянных и сезонных поверхностных водных объектов (озера и реки), площади искусственных водоемов (водохранилищ), а также изменения трофического состояния и мутности более крупных водных объектов (уровень 1). Когда определенный потенциал и данные накоплены, возможно продолжить расширение существующей базы данных с предоставлением показателей о стоке рек и объемах подземных вод (данные уровня 2).

В настоящее время в Республике Беларусь на национальной платформе представления отчетности показатель ЦУР 6.6.1 (а-1) продемонстрирован в виде трех динамических рядов: площадь земель под болотами и водными объектами, процентное изменение пространственной протяженности связанных с водой экосистем, доля площади земель под болотами и водными объектами в общей площади республики². Несоответствие предоставляемых данных глобальной методологии по данному показателю заключается в отсутствии сведений отдельно по видам водных объектов, что затрудняет интерпретацию данных и принятие решений в интересах охраны и восстановления ряда экосистем на уровне административно-территориальной единицы.

Анализ данных по состоянию поверхностных водных объектов республики показал, что в целом за последние 10 лет (с 1990 по 2021 г.) произошло уменьшение объемов речного стока. Особо выделялся период с 2014 по 2016 г., когда произошло существенное снижение стока за счет засушливых летних периодов и сокращения количества осадков. Период с 2018 по 2021 г. также характеризовался снижением объемов речного стока относительно среднегодовых значений³. Анализ данных по изменению площади поверхности воды для разных видов водных объектов ранее в республике не проводился.

Цель исследования – сформировать национальный подход к оценке динамики изменения площади связанных с водой экосистем на основе международной методики расчета показателя ЦУР 6.6.1, и рассчитать значение показателя для разных видов связанных с водой экосистем.

Материалы и методы исследований

Согласно глобальной методологии, связанные с водой экосистемы – это все пресноводные ресурсы как естественные, так и искусственные, включая реки, каналы, озера, водохранилища и т. д.⁴ Под термином площадь поверхности воды водного объекта понимается площадь свободной поверхности воды в поверхностном водном объекте в пределах береговой линии за исключением островов, выраженная в единицах площади (м², га, км²).

Озера представляют собой естественные водоемы, являются ключевыми водными объектами, которые характеризуют состояние природных пресных вод [2], и наблюдение за изменениями их площади является важной задачей, выполняемой в рамках показателя ЦУР 6.6.1.

Для оценки динамики изменения площади озер были использованы данные проведенных в 2008–2010 и в 2017–2020 гг. в РУП «ЦНИИКИВР» инвентаризаций^{5,6,7}. В результате сравнения данных выделен перечень озер, которые присутствуют в обеих инвентаризациях, и по которым есть данные по площади в разные временные периоды для проведения расчета изменения их площади.

Дополнительно для данных по озерам площадь поверхности воды была актуализирована по последним имеющимся космоснимкам *Google Earth* с использованием инструмента измерения площадей

²6.6.1. Динамика изменения площади связанных с водой экосистем [Электронный ресурс]. URL: <http://sdgplatform.belstat.gov.by/sites/belstatfront/index-info.html?indicator=6.6.1> – свободный (дата обращения: 01.08.2022).

³Государственный водный кадастр. водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2021 год) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cricuwr.by/static/files/%D0%93%D0%92%D0%9A%20%D0%B7%D0%B0%202021.pdf> (дата обращения: 01.08.2022).

⁴Измерение динамики изменения площади связанных с водой экосистем / Методика мониторинга достижения целей в области устойчивого развития. Показатель 6.6.1 [Электронный ресурс]. ООН – Окружающая среда. URL: https://www.unwater.org/app/uploads/2020/04/SDG-indicator-661-methodology_Russian.pdf (дата обращения: 01.09.2022).

⁵Государственная программа «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2016–2020 годы. Мероприятие «Инвентаризация водных объектов (реки, озера, водохранилища, пруды, родники, ручьи)»: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 17 марта 2016 года № 205 (Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь).

⁶Инвентаризация водных объектов Республики Беларусь: заключительный отчет РУП «ЦНИИКИВР» о НИР. Минск, 2008. 48 с. Договор № 60-2008/41 (267/08).

⁷Государственная программа «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2021–2025 годы: Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19 февраля 2021 года № 99 (Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь).

программного комплекса QGIS, а также по данным земельно-информационной системы Республики Беларусь и по собственным данным аэрофотосъемок БПЛА⁸.

Измерение площади поверхности воды для отобранных озер осуществлялось с использованием инструмента «калькулятор полей», а также уточнялось для каждого озера с использованием инструмента «измерение площади» (рис. 1).

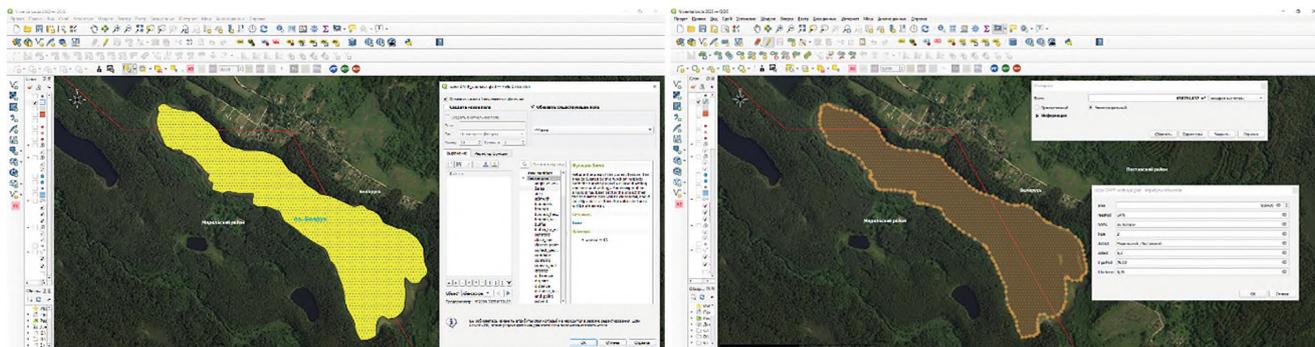


Рис. 1. Создание геометрии и вычисление площади поверхности воды озер картометрическим способом в QGIS

Fig. 1. Creating geometry to determine the water surface area of lakes by cartometric method in QGIS

Для оценки динамики изменения площади озер проведен расчет изменения площади поверхности воды 2041 озера по всей республике.

Водохранилища, согласно глобальной методологии, не являются природными водными экосистемами, которые в обязательном порядке должны нуждаться в охране и восстановлении. Однако при разработке национальной методики было принято решение включать их в расчет, поскольку здесь концентрируются существенные запасы пресной воды. Они являются стратегически важными для республики водными объектами, обеспечивающими бытовое водоснабжение, ирригацию, выработку электроэнергии, регулирование паводковых явлений, рекреацию и др. Вместе с тем в контексте задачи ЦУР 6.6.1 признается, что водохранилища отрицательно воздействуют на взаимосвязь естественных пресноводных систем и считаются непосредственной причиной значительных потерь пресноводного биологического разнообразия⁹.

Размещение водохранилищ по территории республики обусловлено потребностью в воде и природными факторами. Наибольшее количество искусственных водоемов сосредоточено в районе Белорусского Полесья и принадлежат бассейнам рек Припять и Днепр. Для Беларуси характерно, что водохранилища в основном располагаются не на главных реках, а на притоках первого-третьего порядка.

По данным инвентаризации, в Беларуси насчитывается 85 водохранилищ, осуществляющих сезонное регулирование и имеющих площадь при нормальном подпорном уровне более 100 га, их суммарная площадь поверхности воды составляет более 500 км². По месту расположения относительно водотока преобладают водохранилища руслового типа¹⁰.

Основными источниками для анализа данных по площадям водохранилищ являются результаты паспортизации водохранилищ, водохозяйственные паспорта водохранилищ¹¹, справочник «Водохранилища Беларуси», материалы полевых и рекогносцировочных обследований, данные районных предприятий мелиоративных систем, отчетные материалы инспекций природных ресурсов и охраны окружающей среды, имеющиеся справочные материалы [3]. Необходимо отметить, что справочные данные по площадям водохранилищ представлены при нормальном подпорном уровне (НПУ), то есть наивысшем проектном подпорном уровне верхнего бьефа, который может поддерживаться в нормальных условиях эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС). Проведение ретроспективного анализа площади водохранилищ за ряд лет свидетельствует, что площадь многих водохранилищ ни в одном из

⁸Проведение анализа международного опыта оценки динамики изменения площади связанных с водой экосистем для выполнения задачи 6.6 ЦУР 6 по обеспечению охраны и восстановления связанных с водой экосистем и обзор национального законодательства: отчет о НИР, этап 1.1. Минск: РУП «ЦНИИКИВР», 2021. 51 с.

⁹Измерение динамики изменения площади связанных с водой экосистем // Методика мониторинга достижения целей в области устойчивого развития. Показатель 6.6.1 [Электронный ресурс]. ООН – Окружающая среда. URL: https://www.unwater.org/app/uploads/2020/04/SDG-indicator-661-methodology_Russian.pdf (дата обращения: 01.09.2022).

¹⁰Реестр поверхностных водных объектов Республики Беларусь для водохранилищ [Электронный ресурс]. URL: <http://195.50.7.216:8081/watres/makelist/> (дата обращения: 01.08.2022).

¹¹Водные ресурсы Республики Беларусь: справочник [Электронный ресурс]. URL: http://www.cricuwr.by/invent_vo/frontpage.htm (дата обращения: 01.08.2022).

годов не достигала своей проектной расчетной величины, а оставалась на протяжении ряда лет ниже значений НПУ, колеблясь незначительно по сезонам.

Площади поверхности воды для 85 водохранилищ были измерены картографическим методом исследований картометрическим способом с применением средств географических информационных систем. Поскольку для водохранилищ характерно сезонное регулирование, в расчет брались площади, относящиеся к летнему периоду. Водохранилище Дружбы Народов территориально находится на границе двух государств (Беларуси и Литвы). В справочнике дана общая площадь водохранилища, однако, по методике, при расчете будет включена площадь водохранилища, находящаяся на территории нашей республики (рис. 2).

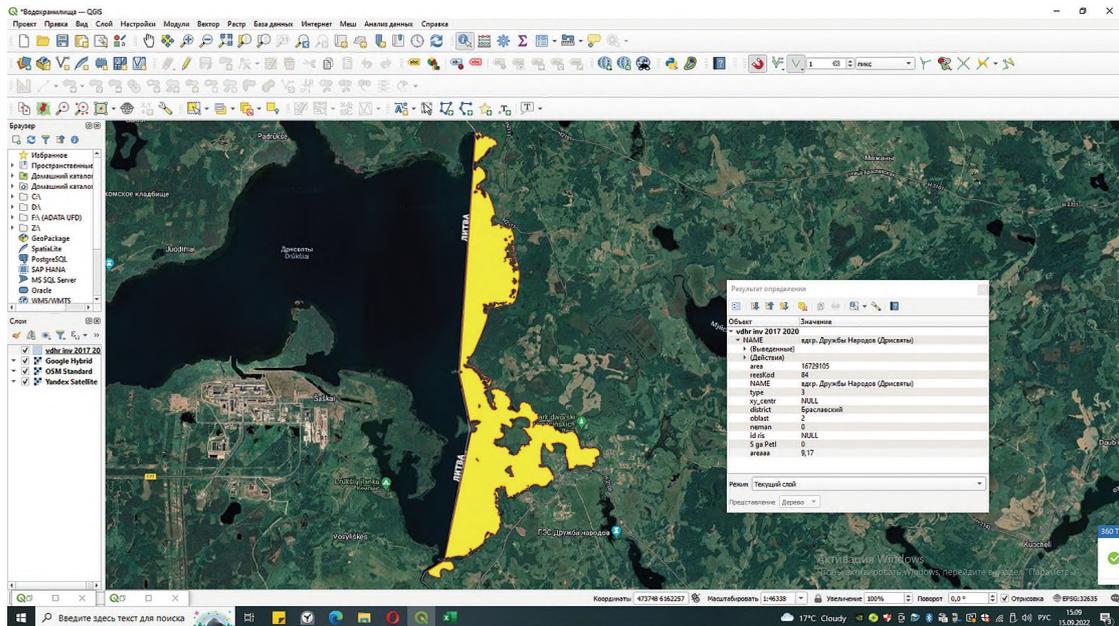


Рис. 2. Определение площади поверхности воды водохранилища Дружбы Народов на территории Республики Беларусь картометрическим способом в QGIS

Fig. 2. Determination of the water surface area of the Druzhby Narodiv reservoir on the territory of the Republic of Belarus by cartometric method in QGIS

В данных инвентаризации рек представлены площади водосборного бассейна и протяженность рек, площадь поверхности воды рек отсутствует и ранее подобные расчеты не проводились.

Для ликвидации пробела и получения данных по площади поверхности воды рек за основу был взят материал из разрабатываемой в настоящее время в РУП «ЦНИИКИВР» ИАС «Водоохранные зоны» в виде *shape-файлов*, из которого далее по картографическим данным произведен расчет площади. Для вычисления площадей создавался *.shape-файл* с типом геометрии полигона. Далее перемещением и созданием точек полигона создавались очертания водной поверхности реки на всем ее протяжении. Островные участки удалялись из полигонов.

Для ретроспективного анализа и базового периода была применена картографическая основа более ранних лет с проведением обработки информации аналогичным образом. Для исключения влияния сезонных процессов были выбраны съемки летнего периода, а при их отсутствии использовали расчетные поправочные коэффициенты для этих участков рек, выведенные на основании сравнения участков, для которых снимки летнего периода имелись в открытом доступе.

Измерение каждого вида водного объекта, включенного в показатель 6.6.1, проводилось по отношению к базовому периоду, который в международной методике определен как период 2000–2004 гг. При этом каждая страна на усмотрение и с учетом субнациональных данных может определять свой базовый период. После усреднения данных всех наблюдений по годам и за пятилетний базовый период, информация сравнивается с последующими пятилетними целевыми периодами (2005–2009, 2010–2014, 2015–2019, 2020–2024 годы).

Очередной раунд глобального мониторинга и отчетности по показателю 6.6.1 ЦУР 6 запланирован на 2023 г. При этом по показателю 6.6.1 данные будут продолжать обновляться ежегодно (в мае-июне) на основе спутниковых наблюдений и по международным экспертным оценкам по результатам исследований пресноводных экосистем для каждого региона.

Определено, что Республика Беларусь вправе применять международную методику расчета показателя 6.6.1 с использованием национального подхода расчета по прокси-показателю, формируемому по трем видам поверхностных водных объектов (озерам, водохранилищам, рекам) без учета площади водно-болотных угодий, которые не входят в категорию поверхностных водных объектов согласно Водному кодексу Республики Беларусь.

На основе сравнения базового и целевого периодов рассчитывается процентное изменение пространственной протяженности с использованием следующей формулы:

$$\% \Delta_i = \frac{(\gamma_i - \beta_i)}{\beta_i} * 100,$$

где i – озеро, водохранилище, река;

β_i – площадь поверхности воды за базовый период;

γ_i – средняя площадь поверхности воды за целевой пятилетний период.

При использовании этой формулы получаемое значение процентных изменений может быть либо положительным, либо отрицательным и служит указанием на то, каким образом изменяется площадь. Полученное процентное изменение пространственной протяженности поверхностных водных объектов истолковывается следующим образом: положительные значения обозначают увеличение площади, отрицательные – уменьшение площади.

В качестве периода сравнения в приведенных расчетах для озер, водохранилищ и рек будет использован период 2008–2012 гг.

Результаты исследования и их обсуждение

Расчет площади поверхности воды озер в разрезе административно-территориальных единиц республики показал, что в Брестской и Витебской областях за исследуемые периоды площадь поверхности воды увеличилась на 5,73 и 1,45 км² соответственно, в то время как в остальных областях уменьшилась на 0,18–9,32 км². Суммарная площадь поверхности воды озер уменьшилась с 1233,24 до 1225,41 км², или на 7,82 км² (табл. 1).

Таблица 1

Динамика изменения площади поверхности воды озер (2041) в Республике Беларусь

Table 1

Dynamics of changes in the water surface area of lakes (2041) in the Republic of Belarus

Область	Количество озер по результатам инвентаризации	Площадь поверхности воды, км ²	
		по данным 2008–2010 гг.	по данным 2018–2022 гг. и расчета по ГИС
Брестская область	148	81,27	87,00
Витебская область	1165	839,81	841,26
Гомельская область	395	84,59	75,27
Гродненская область	115	29,14	28,96
Минская область	112	186,98	182,51
Могилевская область	106	11,44	10,41
Республика Беларусь	2041	1233,24	1225,41

Таким образом, в исследуемый период (2018–2022 гг.) по сравнению с предыдущим (2008–2012 гг.) площадь поверхность воды озер сократилась – на 7,83 км² или 0,63 % (табл. 2).

Таблица 2

Динамика изменения площади поверхности воды озер, рассчитанная по методике мониторинга достижения ЦУР по показателю ЦУР 6.6.1

Table 2

Dynamics of changes in the water surface area of lakes, calculated according to the methodology for monitoring the achievement of SDGs in terms of SDG indicator 6.6.1

Периоды наблюдений	Площадь поверхности воды озер, км ²	Пространственная протяженности озер, %
Период (2008–2012 гг.)	1233,24	
Целевой период (2018–2022 гг.)	1225,41	-0,63

В ходе сравнительного анализа данных о площади поверхности воды озер определены 9 водоемов, для которых значение площади, измеренное картометрически с использованием ГИС, значительно отличается от справочных данных разных лет. К ним относятся следующие озера: Мотольское, Гусата, Матырино, Бобыничи, Выгода, Гонораторское, Баяницкое, Доманровичское, Вейня, площади которых снизилась на 47 %, 84, 46, 91, 98, 73, 96 и 96 % соответственно (табл. 3).

Таблица 3

Озера, площадь поверхности воды в которых претерпела значительные изменения за 14 лет в сторону уменьшения

Table 3

Lakes in which the water surface area has undergone significant changes in the direction of decrease over 14 years

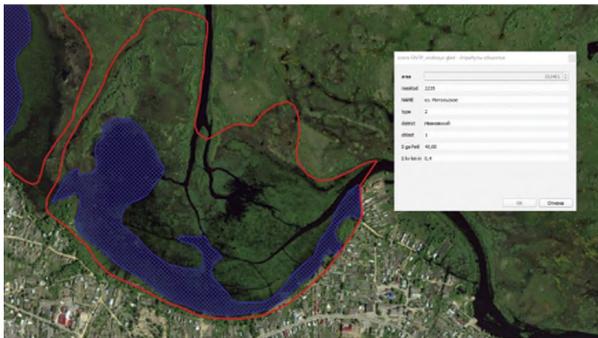
Реестровый номер	Название озера	Район	Область	Площадь поверхности воды, км ²		
				2008–2010 гг.	2017–2020 гг.	2022 г.
2235	Мотольское	Ивановский	Брестская	0,40	0,40	0,21
750	Гусата	Браславский	Витебская	2,40	2,40	0,37
1628	Матырино	Лепельский	Витебская	1,38	1,38	0,38
1244	Бобыничи	Полоцкий	Витебская	0,60	0,60	0,32
623	Выгода	Глусский	Гомельская	0,78	0,76	0,07
526	Гоноратское	Мостовский	Гродненская	0,49	0,49	0,01
2071	Баяницкое	Любанский	Минская	1,01	1,01	0,27
2101	Домановичское	Солигорский	Минская	0,81	0,81	0,03
587	Вейня	Бельничский	Могилевская	1,49	1,49	0,06

В ходе сличения данных 2008–2010 гг. с фактическими установлено, что в настоящее время для данных озер действительно наблюдается значительное сокращение площади поверхности воды (рис. 3).

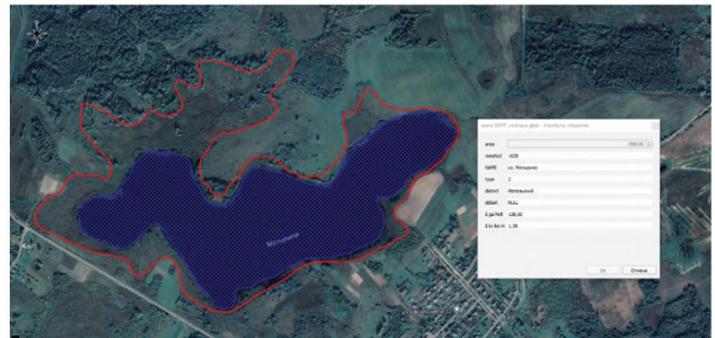
Большинство водохранилищ претерпело изменение площади поверхности воды в сторону уменьшения (табл. 4).

Сокращение площади составило от небольших значений – 0,01–0,08 км² (Бобруйковское, Княжеборское, Великоборское, Днепрец, Смолевичское, Морочно и др.) до значительных – 1,49–5,49 км² (Браславское, Осиповичское, Вилейское). Водоохранилище Корнадское в настоящее время опорожнено, вода в нем отсутствует, поэтому в расчет включено не было.

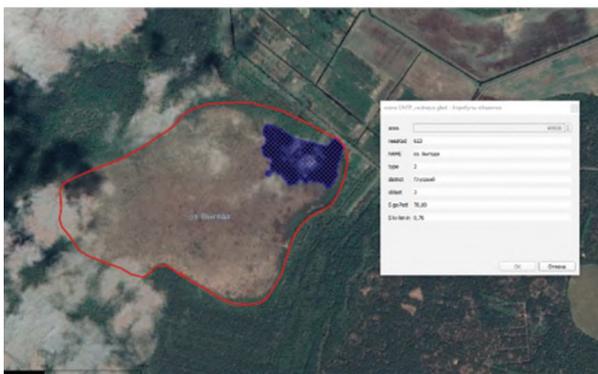
Существенное снижение площади поверхности воды отмечается в водохранилищах Свидное – 0,52 км² (55,3 %), Светлогорское – 0,87 км² (17,0 %), Осиповичское – 5,49 км² (50,4 %), Дубровское – 0,7 км² (26,5 %), Тышковичи – 0,32 км² (27,4 %). Для следующих водохранилищ характерно повышение площади в период 2018–2022 гг. по сравнению с предыдущим периодом (2008–2012 гг.): Гезгальское – 0,15 км² (38,5 %), Добысна – 0,48 км² (81,4 %), Гродненской ГЭС – 787 км² (50,4 %), Смолевичское (ГРЭС) – 0,29 км² (74,4 %).



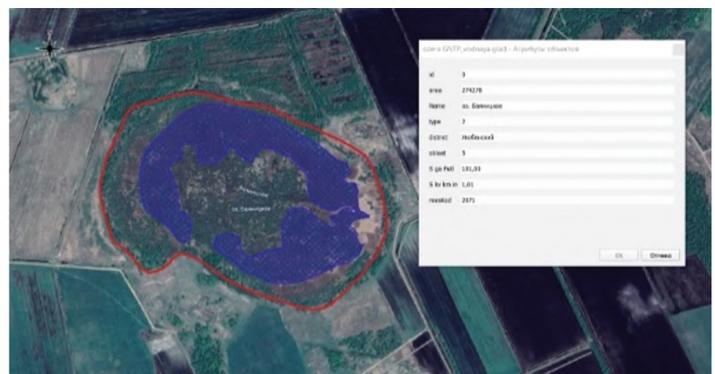
оз. Мотольское



оз. Матырино



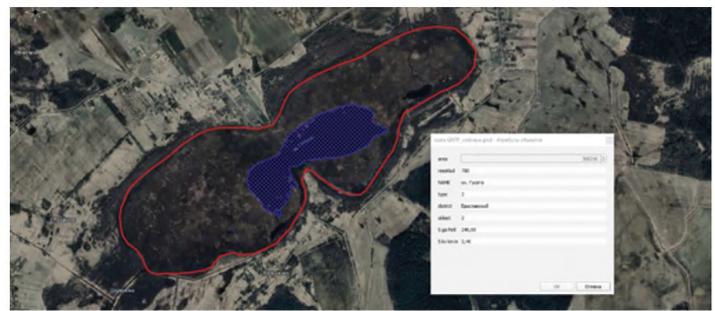
оз. Выгода



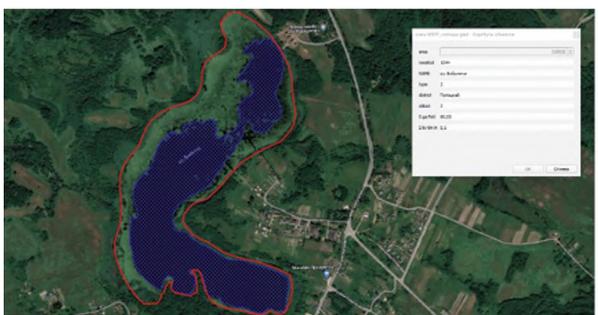
оз. Баяницкое



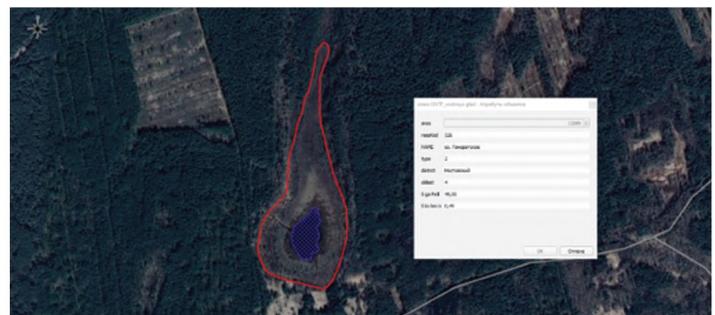
оз. Вейня



оз. Гусата



оз. Бобыничи



оз. Гоноратское

Рис. 3. Визуализация полигонов 2017–2020 гг и фактической площади поверхности воды озер с использованием QGIS

Fig. 3. Visualization of polygons 2017–2020 and the actual water surface area of lakes using QGIS

Изменение площади поверхности воды водохранилищ

Table 4

Changes in the water surface area of reservoirs

Реестровый номер	Название	Площадь поверхности воды, км ²			Изменение площади к периоду 2008–2010 гг.	
		по данным инвентаризации 2008–2010 гг. (при НПУ)	период 2008–2012 гг. (расчет по ГИС)	период 2018–2022 гг. (расчет по ГИС)	км ²	%
30	вдхр. Млынок	1,48	1,24	1,11	-0,13	-10,5
32	вдхр. Свидное	2,20	0,94	0,42	-0,52	-55,3
35	вдхр. Светлогорское	14,37	5,11	4,24	-0,87	-17,0
41	вдхр. Бобруйковское	1,20	0,72	0,69	-0,03	-4,2
42	вдхр. Княжеборское	1,40	1,00	0,97	-0,03	-3,0
44	вдхр. Великоборское	2,70	0,95	0,88	-0,07	-7,4
45	вдхр. Судково	1,00	0,05	0,05	0,00	0,0
49	вдхр. Днепро-Брагинское	9,70	7,87	9,26	1,39	17,7
51	вдхр. Михайловское	2,40	0,48	0,48	0,00	0,0
53	вдхр. Волпянское	1,20	0,52	0,53	0,01	1,9
54	вдхр. Гезгальское	1,22	0,39	0,54	0,15	38,5
56	вдхр. Зельвенское	11,90	10,30	10,37	0,07	0,7
58	вдхр. Гродненской ГЭС	19,38	8,28	16,15	7,87	95,1
61	вдхр. Рачунское	1,50	1,06	1,06	0,00	0,0
63	вдхр. Яновское	1,06	0,61	0,60	-0,01	-1,6
66	вдхр. Горы	1,31	1,17	1,18	0,01	0,9
67	вдхр. Днепрец	0,98	0,91	0,92	0,01	1,1
68	вдхр. Добысна	1,70	0,59	1,07	0,48	81,4
73	вдхр. Милославичское	1,43	1,17	1,05	-0,12	-10,3
75	вдхр. Ореховка	1,02	0,29	0,25	-0,04	-13,8
76	вдхр. Осиповичское	11,87	10,90	5,41	-5,49	-50,4
77	вдхр. Палужское	1,46	1,10	1,20	0,10	9,1
78	вдхр. Рудея	3,85	3,29	3,44	0,15	4,6
81	вдхр. Тетеринское	4,61	3,79	3,81	0,02	0,5
82	вдхр. Чигиринское	23,40	17,11	17,76	0,65	3,8
83	вдхр. Браславское	104,30	98,30	96,81	-1,49	-1,5
84	вдхр. Дружбы Народов (Дрисвяты)	44,50*	9,58	9,17	-0,41	-4,3
85	вдхр. Богинское	13,20	12,20	12,52	0,32	2,6
86	вдхр. Освейское	52,80	52,90	52,13	-0,77	-1,5
87	вдхр. Езерищенское	17,08	16,80	17,09	0,29	1,7
88	вдхр. Лепельское	9,75	10,37	10,43	0,06	0,6
89	вдхр. Добромысленское	1,20	0,66	0,69	0,03	4,6
90	вдхр. Хоробрувка	31,97	28,70	28,71	0,01	0,03
91	вдхр. Крапивенка	1,08	0,72	0,70	-0,02	-2,8
92	вдхр. Гомельское	23,24	23,24	22,44	-0,80	-3,4
93	вдхр. Клястицкое	1,25	0,98	0,87	-0,11	-11,2
94	вдхр. Лукомское (ГРЭС)	36,70	36,90	37,19	0,29	0,8
95	вдхр. Гореничское	1,10	0,84	0,85	0,01	1,2
96	вдхр. Вилейское	77,00	62,30	60,69	-1,61	-2,6
97	вдхр. Саковщинское	1,10	1,00	1,10	0,1	10,0
98	вдхр. Краснослободское	23,60	21,60	21,81	0,21	1,0

Окончание табл. 4

Ending table 4

99	вдхр. Селявское (оз. Селявское)	24,50	19,10	20,66	1,56	8,2
100	вдхр. Игрушка	1,60	0,55	0,54	-0,01	-1,8
102	вдхр. Плещеницкое	2,00	1,54	1,76	0,22	14,3
103	вдхр. Любанское	22,5	19,48	19,18	-0,3	-1,5
104	вдхр. Резервное	3,50	3,49	3,12	-0,37	-10,6
105	вдхр. Дрозды	2,38	2,38	2,19	-0,19	-8,0
106	вдхр. Вяча	1,70	1,56	1,33	-0,23	-14,7
107	вдхр. Заславское	31,10	25,00	24,21	-0,79	-3,2
108	вдхр. Чижовское	2,80	1,43	1,52	0,09	6,3
109	вдхр. Цнянское	0,90	0,85	0,82	-0,03	-3,5
110	вдхр. Рудня	3,80	3,09	3,10	0,01	0,3
111	вдхр. Петровичское	4,80	2,94	3,20	0,26	8,8
112	вдхр. Дубровское	3,45	2,98	2,19	-0,79	-26,5
113	вдхр. Смолевичское (ГРЭС)	1,10	0,39	0,68	0,29	74,4
114	вдхр. Смолевичское	1,00	0,93	0,92	-0,01	-1,1
115	вдхр. Солигорское	23,10	18,10	19,94	1,84	10,2
116	вдхр. Левки	4,40	3,43	3,20	-0,23	-6,7
117	вдхр. Лошанское	3,40	2,47	2,53	0,06	2,4
119	вдхр. Криница	0,96	0,94	1,28	0,34	36,2
120	вдхр. Гаць	1,26	1,10	1,11	0,01	0,9
121	вдхр. Домановское	1,52	0,45	0,50	0,05	11,1
122	вдхр. Кутовщинское	1,00	0,99	0,99	0	0,0
123	вдхр. Миничи	5,40	2,96	3,02	0,06	2,0
124	вдхр. Паперня	1,80	1,10	1,09	-0,01	-0,9
125	вдхр. Репихово	1,10	0,82	0,82	0	0,0
126	вдхр. Чемельнское	1,30	1,24	1,23	-0,01	-0,8
127	вдхр. Беловежская Пуца	3,30	1,10	1,01	-0,09	-8,2
128	вдхр. Днепро-Бугское	1,47	1,39	1,19	-0,20	-14,4
129	вдхр. Луковское	5,40	5,40	5,03	-0,37	-6,9
130	вдхр. Олгушское	2,42	1,89	1,82	-0,07	-3,7
131	вдхр. Ореховское	1,45	1,18	1,17	-0,01	-0,9
132	вдхр. Береза 1	18,70	16,97	16,78	-0,19	-1,1
133	вдхр. Великие Орлы	1,00	0,82	0,82	0,00	0,0
134	вдхр. Велута	7,60	6,49	6,32	-0,17	-2,6
135	вдхр. Джидинье	2,52	1,67	1,62	-0,05	-3,0
136	вдхр. Жидче	1,16	0,89	0,87	-0,02	-2,3
137	вдхр. Либерполь	2,90	1,76	1,72	-0,04	-2,3
138	вдхр. Локтыши	15,90	14,10	13,09	-1,01	-7,2
139	вдхр. Морочно	1,37	1,24	1,17	-0,07	-5,7
140	вдхр. Погост	16,46	12,50	11,56	-0,94	-7,5
141	вдхр. Селец	20,70	17,34	17,48	0,14	0,8
142	вдхр. Собельское	2,87	2,11	1,96	-0,15	-7,1
143	вдхр. Тышковичи	2,09	1,17	0,85	-0,32	-27,4
	Итого	779,44	664,26	662,23	-2,03	-0,3

*Данные площади в итоговый расчет не включались.

Браславское водохранилище озерного типа создано на базе озер Дривяты, Несъпиш, Недрово, Цно, Потех, Войсо, Болойсо, Струсно, Снуды. В архивных данных представлена суммарная площадь поверхности воды этих озер – 104,3 км².

В целом, при сравнении суммарных площадей поверхности воды водохранилищ за разные периоды измерений отмечается сокращение площади. Так, суммарная площадь водохранилищ в период 2008–2012 гг. составила 664,26 км², в то время как в период 2018–2022 гг. – 662,23 км², то есть сократилась на 2,03 км² или 0,31 %.

Расчет динамики изменения пространственной протяженности водохранилищ свидетельствует, что процентное изменение площади составило -0,31 %, то есть площадь водохранилищ в настоящее время претерпело изменения в сторону сокращения (табл. 5).

Таблица 5

Динамика изменения площади поверхности воды водохранилищ (84), рассчитанная по методике мониторинга достижения целей в области устойчивого развития по показателю ЦУР 6.6.1

Table 5

Dynamics of changes in the water surface area of reservoirs (84), calculated according to the methodology for monitoring the achievement of sustainable development goals for SDG indicator 6.6.1

Периоды наблюдений	Площадь поверхности воды, км ²	Пространственная протяженность водохранилищ, %
Период (2008–2012 гг.)	664,26	–
Целевой период (2018–2022 гг.)	662,23	-0,31

Проведено измерение площади больших рек: Горынь, Березина, Днепр, Неман, Западная Двина, Сож, Припять, Западный Буг, Ю а также средних – Беседь, Виляя, Друть, Западная Березина, Ипуть, Остер, Птичь, Свислочь, Уборть, Щара, Ясельда (табл. 6).

Таблица 6

Изменение площади поверхности воды больших и средних рек

Table 6

Changes in the water surface area of large rivers

Область	Площадь поверхности воды, км ²		Изменение площади к периоду 2008–2012 гг.	
	период (2008–2012 гг.)	период (2018–2022 гг.)	км ²	%
Горынь	9,46	11,21	1,75	18,5
Березина	83,3	79,79	-3,51	-4,2
Днепр	169,64	163,28	-6,36	-3,7
Неман	70,19	70,22	0,03	0,0
Западная Двина	95,73	101,89	6,16	6,4
Сож	80,74	83,72	2,98	3,7
Припять	131,51	125,54	-5,97	-4,5
Западный Буг	6,34	7,50	1,16	18,3
Беседь	3,78	4,07	0,29	7,7
Виляя	21,06	22,47	1,41	6,7
Друть	11,11	12,29	1,18	10,6
Западная Березина	6,13	6,38	0,25	4,1
Ипуть	6,96	6,49	-0,47	-6,8
Остер	3,49	3,03	-0,46	-13,2
Птичь	20,66	19,60	-1,06	-5,1
Свислочь	31,21	31,74	0,53	1,7
Уборть	27,42	27,56	0,14	0,5
Щара	11,34	11,36	0,02	0,2
Ясельда	5,87	5,65	-0,22	-3,7
Итого	795,94	793,79	-2,15	-0,3

Анализ изменения площади поверхности воды больших и средних рек показал как на увеличение площади для отдельных рек, так и ее снижение. Так, площадь поверхности воды рек Горынь, Неман, Западная

Двина, Сож, Западный Буг, Беседь, Виляя, Друть, Западная Березина, Свислочь, Уборть, Щара, Ясельда возрастала в период измерений 2018–2022 гг. по сравнению с предыдущим периодом 2008–2012 гг. (рис. 4). При этом увеличение площади для большинства рек оказалось небольшим – от 0,02 до 1,75 км² (в то время как для рек Сож и Западная Двина в данный период исследований увеличение составило 2,98 км² (3,7 %) и 6,16 км² (6,4 %) соответственно).

Многие реки претерпели изменения площади поверхности воды в сторону уменьшения – Березина, Днепр, Припять, Ипуть, Остер, Птичь, Ясельда. Их площадь снизилась на 0,22–6,36 км² (рис. 5). Суммарная площадь рек за исследуемые периоды сравнения снизилась с 795,94 до 793,79 км², то есть на 2,15 км² или на 0,3 %.

В целом, наблюдается снижение площади поверхности рек за период 2018–2022 гг. по сравнению с периодом 2008–2012 гг. Величина пространственной протяженности для рек составила -0,27 % (табл. 7).



Рис. 4. Сравнение изменения площади водной поверхности на участке р. Горынь вблизи аг. Березное Столинского района: а) 2012 г. – зеленый цвет, б) 2020 г. – синий цвет

Fig. 4. Comparison of changes in the area of the water surface in the section of the river Goryn near Ag. Berezhnoye, Stolín district: а) 2012 – green, б) 2020 – blue



Рис. 5. Сравнение изменения площади водной поверхности на участке р. Ясельда: а) 2012 г., б) 2020 г.

Fig. 5. Comparison of changes in the area of the water surface in the section of the river Yaselda: а) 2012, б) 2020

Таблица 7

Динамика изменения площади поверхности воды больших (8) и средних рек (11)

Table 7

Dynamics of changes in the water surface area of large rivers (8) and middle rivers (11)

Периоды наблюдений	Площадь поверхности воды, км ²	Пространственная протяженность рек, %
Период (2008–2012 гг.)	795,94	–
Целевой период (2018–2022 гг.)	793,79	-0,27

Изменение данных по видам экосистем важно, так как позволяет принимать необходимые выводы. При этом, оценка и сравнение комплекса изменений в нескольких видах экосистем позволяет принимать решения в интересах охраны и восстановления ряда экосистем на уровне административно-территориальной единицы. Например, данные по конкретному району могут указывать на то, что площадь естественных водоемов (озер) уменьшается, а площадь искусственных водоемов (водохранилищ) увеличивается или наоборот. Получив несколько взаимосвязанных наборов данных в пределах границ той или иной водосборной площади, можно лучше разобраться в причинах и последствиях изменений в масштабах экосистем. Оценка тенденций по данным всех субпоказателей может дать более полную картину и привести к решениям в области политики и планирования, способствующим улучшению состояния экосистем или их способности поддерживать свою структуру и функцию с течением времени в условиях извне¹².

Методика мониторинга показателя предназначена в первую очередь для обеспечения целостности экологических функций связанных с водой экосистем естественных хранилищ пресной воды во время засух и регулирования стока в случае наводнений, для сохранения биоразнообразия видов, очищения воды и пополнения запасов грунтовых вод.

Республика Беларусь в настоящее время отчетность по показателю 6.6.1 представляет в виде следующих данных: площадь земель под болотами и водными объектами, доля площади земель под болотами и водными объектами в общей площади республики, процентное изменение пространственной протяженности (табл. 8)^{13,14}.

Таблица 8

Национальные показатели Республики Беларусь по отчетности ЦУР 6.6.1¹⁵

Table 8

National indicators of the Republic of Belarus according to SDG 6.6.1 reporting¹⁵

Год	Показатель	Значение
2018	Площадь земель под болотами и водными объектами (км ²)	12935,6
	Доля площади земель под болотами и водными объектами в общей площади республики (%)	6,2
	Процентное изменение пространственной протяженности	7,5
2019	Площадь земель под болотами и водными объектами (км ²)	12827,4
	Доля площади земель под болотами и водными объектами в общей площади республики (%)	6,2
	Процентное изменение пространственной протяженности	8,2
2020	Площадь земель под болотами и водными объектами (км ²)	12737,6
	Доля площади земель под болотами и водными объектами в общей площади республики (%)	6,1
	Процентное изменение пространственной протяженности	8,9
2021	Площадь земель под болотами и водными объектами (км ²)	12659,0
	Доля площади земель под болотами и водными объектами в общей площади республики (%)	6,1
	Процентное изменение пространственной протяженности	9,4
2022	Площадь земель под болотами и водными объектами (км ²)	12560,2
	Доля площади земель под болотами и водными объектами в общей площади республики (%)	6,0
	Процентное изменение пространственной протяженности	10,2

Согласно данным реестра земельных ресурсов, в Республике Беларусь доля площади земель под болотами и водными объектами снизилась за последние 14 лет на 10,4 % к базисному периоду, с 6,7 до 6,0 % от общей площади страны^{16,17}.

Анализ предоставленных данных свидетельствует, что процентное изменение пространственной протяженности характеризуется положительной величиной и указывает на отрицательную динамику

¹²Измерение динамики изменения площади связанных с водой экосистем // Методика мониторинга достижения целей в области устойчивого развития. Показатель 6.6.1 [Электронный ресурс]. ООН – Окружающая среда. URL: https://www.unwater.org/app/uploads/2020/04/SDG-indicator-661-methodology_Russian.pdf (дата обращения: 01.09.2022).

¹³6.6.1. Динамика изменения площади связанных с водой экосистем [Электронный ресурс]. URL: <http://sdgplatform.belstat.gov.by/sites/belstatfront/index-info.html?indicator=6.6.1> (дата обращения: 01.08.2022).

¹⁴Государственный комитет по имуществу Республики Беларусь. Реестр земельных ресурсов Республики Беларусь (по состоянию на 1 января 2014–2022 гг.) [Электронный ресурс]. URL: http://www.gki.gov.by/ru/activity_branches-land-reestr/ (дата обращения: 01.07.2022).

¹⁵6.6.1. Динамика изменения площади связанных с водой экосистем [Электронный ресурс]. URL: <http://sdgplatform.belstat.gov.by/sites/belstatfront/index-info.html?indicator=6.6.1> (дата обращения: 01.08.2022).

¹⁶6.6.1. Динамика изменения площади связанных с водой экосистем [Электронный ресурс]. URL: <http://sdgplatform.belstat.gov.by/sites/belstatfront/index-info.html?indicator=6.6.1> (дата обращения: 01.08.2022).

¹⁷Государственный комитет по имуществу Республики Беларусь. Реестр земельных ресурсов Республики Беларусь (по состоянию на 1 января 2014–2022 гг.) [Электронный ресурс]. URL: http://www.gki.gov.by/ru/activity_branches-land-reestr/ (дата обращения: 01.07.2022).

изменения пространственной протяженности. При этом абсолютные значения изменений с каждым годом увеличивались от 0,5 % в 2007 г. до 10,2 % в текущем году, что свидетельствует о еще большем значении уменьшения площади земель под болотами и водными объектами.

Необходимо учитывать, что в показатель «земли, занятые под водными объектами» включаются площади островов, находящихся среди воды, частично пойменные территории, измененное русло, береговые территории и т. д. Отслеживать тенденции изменения площади поверхности водных объектов возможно только на основании разделения и анализа данных отдельно для разных видов водных объектов (озер, рек, водохранилищ), как рекомендовано в международной методике по показателю ЦУР 6.6.1. Таким образом, наблюдающаяся тенденция сокращения площади поверхности воды для водных объектов Республики Беларусь приобрела цифровое выражение, процентное изменение площади составило для озер – -0,63 %, для водохранилищ – -0,31, для рек – -0,27 и в целом по республике – -0,45 %.

Заключение

В основу национального подхода по формированию показателя 6.6.1 «Динамика изменения площади связанных с водой экосистем» положена международная методика по расчету и формированию данного показателя с ее адаптацией под национальные особенности проведения оценки площадей связанных с водой экосистем с использованием показателей для трех видов водных объектов: динамика изменения площади поверхности воды озер, водохранилищ и рек. Определено, что Республика Беларусь вправе применять международную методику расчета показателя 6.6.1 с использованием национального подхода расчета по прокси-показателю, формируемому без учета площади водно-болотных угодий, как не входящих в категорию поверхностных водных объектов согласно Водному кодексу.

При изучении подходов применения международных категорий и индикаторов к оценке показателя в Беларуси в части средств измерения площади поверхности воды и источников информации для расчета показателя выявлено, что при расчете площади поверхности воды для водных объектов на территории Беларуси наиболее достоверным и обоснованным как с точки зрения точности проводимых измерений, так и перечня включенных в измерения водных объектов будут являться данные проведенных инвентаризаций поверхностных водных объектов, выполненных в РУП «ЦНИИКИВР» в разные временные периоды (в рамках мероприятия «Инвентаризация водных объектов (реки, озера, водохранилища, пруды, родники, ручьи)» ГП «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2016–2020 годы, а также в рамках мероприятия «Инвентаризация поверхностных водных объектов (водотоки с площадью водосбора менее 30 кв. километров, водоемы с площадью водной глади менее 0,5 кв. километра)» ГП «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2021–2025 годы), данные земельно-информационной системы Республики Беларусь и геосервисов.

Проведен расчет изменения площади поверхности воды для озер, водохранилищ, рек. Показано, что в исследуемый период (2018–2022 гг.) по сравнению с предыдущим (2008–2012 гг.) площадь поверхности воды озер (общим количеством 2041) сократилась на 7,83 км² или 0,63 %. Отмечается тенденция к сокращению площадей поверхности воды водохранилищ (84) за исследуемый период. Так, суммарная площадь водохранилищ в период 2008–2012 гг. составила 664,26 км², в то время как в период 2018–2022 гг. – 662,23 км², то есть сократилась на 2,03 км² или 0,31 %. Наблюдается снижение площади поверхности рек (19) за период 2018–2022 гг. по сравнению с периодом 2008–2012 гг. на 2,15 км² или 0,27 %.

Следует отметить, что все виды поверхностных водных объектов (озера, реки, водохранилища) претерпели изменения в сторону уменьшения площади поверхности воды. В сумме сокращение площади составило 12,01 км² (0,45 %).

Библиографические ссылки

1. Дубенок СА, Кулаков АЮ. *Имплементация показателей целей устойчивого развития, связанных с водой: опыт Республики Беларусь*. Минск: Четыре четверти, 2020. 126 с.
2. Дзісько НА і інш., рэдкалегія. *Блакітная кніга Беларусі: энцыклапедыя*. Мінск: БелЭн, 1994. 415 с.
3. Калинин МЮ, редактор. *Водохранилища Беларуси: справочник*. Минск: Полиграфкомбинат им. Я. Коласа, 2005. 182 с.

References

1. Dubenok SA, Kulakov AYU. *Implementatsiya pokazatelej celej ustojchivogo razvitiya, svyazannyh s vodoy: opyt Respubliki Belarus'* [Implementation of indicators of sustainable development goals related to water: the experience of the Republic of Belarus]. Minsk: Chetyre chetverti; 2020. 126 p. Russian.
2. Dziisko NA, et al, editorial board. *Blakitnaya kniga Belarusi: encyklopedia* [Blue book of Belarus]. Minsk: BelEn; 1994. 415 p. Belarusian.
3. Kalinin My, editor. *Vodohranilishcha Belarusi: spravochnik* [Reservoirs of Belarus: a reference book]. Minsk: Polygraph Combine Ya. Kolas; 2005. 182 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 10.12.2022.
Received by editorial board 10.12.2022.

УДК 634.737:581.5:581.522.4(476)

НАКОПЛЕНИЕ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ПЛОДАХ НОВЫХ ИНТРОДУЦИРОВАННЫХ СОРТОВ ЖИМОЛОСТИ СЪЕДОБНОЙ (*LONICERA EDULIS* TURCZ. EX FREYN) В УСЛОВИЯХ БЕЛАРУСИ

Ж. А. РУПАСОВА¹⁾, К. А. ДОБРЯНСКАЯ¹⁾, Д. О. СУЛИМ¹⁾, В. С. ЗАДАЛЯ¹⁾, Н. Б. ПАВЛОВСКИЙ¹⁾,
А. Г. ПАВЛОВСКАЯ¹⁾, В. Г. ШАТРАВКО¹⁾, П. Н. БЕЛЫЙ¹⁾, Л. В. ГОНЧАРОВА¹⁾, Т. В. ШПИТАЛЬНАЯ¹⁾

¹⁾Центральный ботанический сад, Национальная академия наук Беларуси,
ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь

Приведены результаты сравнительного анализа в южной агроклиматической зоне Беларуси в контрастные по гидротермическому режиму сезоны 2021 и 2022 годов параметров накопления основных групп биофлавоноидов и дубильных веществ в плодах 5 новых интродуцированных сортов жимолости съедобной – *Aurora*, *Honeybee*, *Indigo gem*, *Wojtek*, *Zojka* и районированного сорта *Ленинградский великан*, выбранного в качестве эталона сравнения. Установлено, что пониженный и весьма неравномерный температурный фон второго сезона в период формирования плодов способствовал их преимущественному обогащению по сравнению с предыдущим, более теплым сезоном, на 8–50 % собственно антоцианами и на 13–43 % дубильными веществами, наиболее значительному в первом случае у сорта *Honey bee*, во втором – у сортов *Ленинградский великан* и *Indigo gem*, на фоне преимущественного обеднения на 14–38 % лейкоантоцианами и в меньшей степени (на 6–14 %) катехинами при отсутствии значимых межсезонных различий в накоплении флавонолов и в большинстве случаев в общем выходе Р-витаминов. У большинства таксонов жимолости, особенно у сорта *Honey bee*, установлено позитивное влияние неблагоприятного температурного фона

Образец цитирования:

Рупасова ЖА, Добрянская КА, Сулим ДО, Задаля ВС, Павловский НБ, Павловская АГ, Шатравко ВГ, Белый ПН, Гончарова ЛВ, Шпитальная ТВ. Накопление фенольных соединений в плодах новых интродуцированных сортов жимолости съедобной (*Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn) в условиях Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;1:81–89.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-81-89>

For citation:

Rupasova ZhA, Dobryanskaya KA, Sulim DO, Zadalia VS, Pavlovsky NB, Pavlovskaya AG, Shatravko VG, Bely PN, Goncharova LV, Shpitalnaya TV. Accumulation of phenolic compounds in the fruit of new introduced varieties of (*Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn) in the conditions of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;1:81–89. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-81-89>

Авторы:

Жанна Александровна Рупасова – доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси; заведующий лабораторией химии растений.

Ксения Андреевна Добрянская – младший научный сотрудник лаборатории химии растений.

Дарья Олеговна Сулим – младший научный сотрудник лаборатории химии растений.

Виктория Сергеевна Задаля – научный сотрудник лаборатории химии растений.

Николай Болеславович Павловский – кандидат биологических наук; заведующий лабораторией интродукции и технологии ягодных растений.

Алла Генриховна Павловская – научный сотрудник лаборатории интродукции и технологии ягодных растений.

Валентин Геннадьевич Шатравко – кандидат сельскохозяйственных наук; директор.

Павел Николаевич Белый – кандидат биологических наук; ученый секретарь.

Людмила Владимировна Гончарова – кандидат биологических наук, доцент; заместитель директора по научной и инновационной работе.

Тамара Васильевна Шпитальная – заведующий лабораторией интродукции древесных растений.

Authors:

Zhanna A. Rupasova, doctor of science (biology), full professor, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus; head of the laboratory of plant chemistry.

j.rupasova@cbg.org.by

Ksenia A. Dobryanskaya, junior researcher at the laboratory of plant chemistry.

k.dobryanskaya01@gmail.com

Daria O. Sulim, junior researcher at the laboratory of plant chemistry.

sulimdaria@gmail.com

Viktoriya S. Zadalia, researcher of the laboratory of plant chemistry.

zada@mail.ru

Nikolai B. Pavlovsky, PhD (biology); head of the laboratory of introduction and technology of berry plants.

pavlovskiy@tut.by

Alla G. Pavlovskaya, researcher at the laboratory of berry plant introduction and technology.

pavlovskiy@tut.by

Valentin G. Shatravko, PhD (agriculture); director.

office@cbg.org.by

Pavel N. Belyi, PhD (biology); scientific secretary.

belyi@cbg.org.by

Lyudmila N. Goncharova, PhD (biology), docent; deputy director for research and innovation.

L.Goncharova@cbg.org.by

Tamara V. Shpitalnaya, head of the laboratory of woody plant introduction.

T.Shpitalnaya@cbg.org.by

на совокупность характеристик фенольного комплекса плодов и негативное у сорта Indigo gem при наиболее выраженной его устойчивости к воздействию данного фактора у сорта *Wojtek*.

Ключевые слова: погодные условия; жимолость съедобная; сорта; плоды; дубильные вещества; биофлавоноиды; антоциановые пигменты; катехины; флавонолы.

ACCUMULATION OF PHENOLIC COMPOUNDS IN THE FRUIT OF NEW INTRODUCED VARIETIES OF (*LONICERA EDULIS* TURCZ.EX FREYN) IN THE CONDITIONS OF BELARUS

Zh. A. RUPASOVA^a, K. A. DOBRYANSKAYA^a, D. O. SULIM^a, V. S. ZADALIA^a, N. B. PAVLOVSKY^a,
A. G. PAVLOVSKAYA^a, V. G. SHATRAVKA^a, P. N. BELY^a, L. V. GONCHAROVA^a, T. V. SHPITALNAYA^a

^aCentral Botanical Garden, National Academy of Sciences of Belarus,
2v Surhanava Street, Minsk 220012, Belarus
Corresponding author: Zh. A. Rupasova (j.rupasova@cbg.org.by)

The results of a comparative study in the southern agroclimatic zone of Belarus in the contrasting hydrothermal regime seasons of 2021 and 2022 are presented. parameters of accumulation of the main groups of bioflavonoids and tannins in the fruits of 5 new introduced varieties of edible honeysuckle – *Aurora*, *Honeybee*, *Indigo Gem*, *Wojtek*, *Zojka* and the zoned variety *Leningradsky giant*, chosen as a comparison standard. It was established that the reduced and very uneven temperature background of the second season during the period of fruit formation contributed to their preferential enrichment in comparison with the previous, warmer season by 8–50 % in anthocyanins proper and by 13–43 % in tannins, the most significant in the first case in varieties *Honey bee*, in the second – in varieties *Leningradsky giant* and *Indigo gem*, against the background of a predominant depletion of 14–38 % in leucoanthocyanins and to a lesser extent (by 6–14 %) in catechins in the absence of significant interseasonal differences in the accumulation of flavonols and in most cases in overall output of P-vitamins. In most honeysuckle taxa, especially in the *Honey bee* variety, a positive effect of an unfavorable temperature background on the totality of the characteristics of the phenolic complex of fruits and a negative one in the *Indigo gem* variety were found, with the most pronounced resistance to this factor in the *Wojtek* variety.

Keywords: weather conditions; edible honeysuckle; varieties; fruits; tannins; bioflavonoids; antocian pigments; catechins; flavonols.

Введение

Важнейшим аспектом интродукционных исследований, связанных с сортоизучением малораспространенных культур плодовоговодства, является сравнительная оценка биохимического состава плодов в многолетнем цикле наблюдений, дающая представление не только о его генотипических особенностях, но и о степени зависимости содержания действующих веществ от гидротермического режима сезона, в значительной мере определяющей их органолептические свойства. Рассмотрение данного аспекта ответной реакции новых, ранее не изучавшихся интродуцированных сортов *Lonicera edulis* на комплексное воздействие метеорологических факторов представляется нам весьма актуальным, поскольку крайне неустойчивый характер погодных условий в период вегетации растений и созревания их плодов, свойственный Белорусскому региону, как правило, существенно влияет на темпы накопления тех или иных соединений, оказывая тем самым корригирующее действие на питательную и витаминную ценность ягодной продукции [1; 2]. Изучение же данного вопроса позволит выявить сорта жимолости съедобной, наиболее перспективные для выращивания не только по вкусовым свойствам плодов, обусловленным особенностями их биохимического состава, но и по степени устойчивости его отдельных компонентов к комплексному воздействию метеорологических факторов в районе интродукции.

Цель исследования: определить степень зависимости от погодных условий вегетационного периода содержания дубильных веществ и основных групп биофлавоноидов, обладающих высоким уровнем биологической активности и широким спектром действия на человеческий организм [3], в плодах новых интродуцированных сортов *Lonicera edulis*.

Материалы и методы исследований

Исследования выполнены в 2021–2022 гг. в опытных посадках жимолости съедобной на экспериментальном участке отраслевой лаборатории интродукции и технологии нетрадиционных ягодных растений

Центрального ботанического сада НАН Беларуси (Ганцевичский р-н Брестской обл.), находящимся на территории южной агроклиматической зоны Беларуси в районе распространения легких песчаных дерново-подзолистых почв и осушенных верховых торфяников.

Объектами биохимических исследований являлись достигшие стадии съёмной зрелости плоды 5 новых интродуцированных сортов *Lonicera edulis* – *Aurora*, *Honeybee*, *Indigo Gem*, *Wojtek*, *Zojka* и привлеченного в качестве эталона сравнения стандартного районированного сорта *Ленинградский великан*.

В высушенных при температуре 60 °С пробах растительного материала определяли суммарное содержание антоциановых пигментов по методу T. Swain, W. E. Hillis [4], с построением градуировочной кривой по кристаллическому цианидину, полученному из плодов аронии черноплодной и очищенному по методике Ю. Г. Скориковой и Э. А. Шафтан [5]; собственно антоцианов и суммы катехинов (с использованием ванилинового реактива) – фотоэлектроколориметрическим методом [6; 7]; суммы флавонолов (в пересчете на рутин) – спектрофотометрическим методом [7]; дубильных веществ (танинов) – титриметрическим методом Левенталья [8]. Все аналитические определения выполнены в двукратной биологической и трехкратной аналитической повторности. Данные статистически обработаны с использованием программы *Excel*.

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнительный анализ погодных условий в годы исследований показал их выраженную контрастность, что наглядно иллюстрирует табл. 1. Так, в первый год наблюдений среднемесячная температура воздуха в апреле и мае на 12 и 8 % уступала средним многолетним значениям за период 1981–2010 гг., тогда как в июне и июле установилась сухая и жаркая погода с превышением на 21–22 % средней многолетней нормы, а в августе и сентябре средние температурные показатели практически соответствовали норме. При этом в мае, в начале формирования плодов жимолости, на фоне заметного похолодания, количество выпавших осадков более чем вдвое превысило среднюю многолетнюю норму, что, по нашим предположениям, могло негативно сказаться на дальнейшем прохождении сезонного цикла развития растений и даже отразиться на качестве их плодов. Вместе с тем избыточное выпадение атмосферных осадков в августе и сентябре должно было способствовать успешной закладке цветковых почек, являющейся необходимой предпосылкой для получения высокого урожая ягодной продукции в следующем сезоне. Температурный фон вегетационного периода 2022 г., особенно в весенние месяцы, был заметно ниже, чем в предыдущий год наблюдений, при чрезмерном избытке атмосферных осадков, в 2,4 раза превосходившем многолетнюю норму в апреле и сменившем его дефиците влаги в мае и июне.

Таблица 1

Среднемесячные характеристики гидротермического режима вегетационного периода в районе исследований в годы наблюдений (по данным Белгидромета)

Table 1

Average monthly characteristics of the hydrothermal regime of the growing season in the study area during the years of observation (according to Belhydromet data)

Месяц	Температура воздуха, °С					Осадки, мм		
	средняя	норма	% от нормы	максимальная	минимальная	сумма	норма	% от нормы
2021 г.								
Апрель	6,6	7,5	88	21,3	-4,0	34	38	89
Май	12,4	13,5	92	23,8	1,5	136	63	216
Июнь	19,9	16,4	121	35,5	1,8	44	89	49
Июль	22,6	18,5	122	35,1	10,1	76	91	84
Август	17,2	17,4	99	29,3	5,9	160	62	258
Сентябрь	11,1	12,2	91	26,6	1,5	84	55	153
2022 г.								
Апрель	5,6	7,5	75	18,7	-5,1	92	38	242
Май	12,0	13,5	89	29,3	-3,1	40	63	63
Июнь	19,1	16,4	117	32,4	5,4	48	89	54
Июль	18,5	18,5	100	30,9	7,4	86	91	95
Август	20,7	17,4	119	33,0	7,7	19	62	31
Сентябрь	10,5	12,2	86	21,2	0,4	76	55	138

Лишь в июле их количество приблизилось к средним многолетним значениям. При этом довольно низкие температурные показатели на протяжении весенних и первого летнего месяцев характеризовались заметными колебаниями, тогда как в августе оказались выше обычных при остром дефиците влаги, в то время как сентябрь был отмечен пониженным температурным фоном при избыточном выпадении атмосферных осадков. Таким образом, вегетационный период 2022 г. характеризовался более низким, причем весьма неравномерным температурным фоном по сравнению с предыдущим сезоном, особенно во время формирования плодов опытных растений, что привело к значительному запаздыванию сроков их созревания. Разумеется, это не могло не отразиться на накоплении в них соединений фенольной природы, в том числе биофлавоноидов.

По нашим данным (табл. 2, 3), общее количество последних в сухой массе плодов исследуемых таксонов жимолости в условиях сезонов 2021 и 2022 годов варьировалось в сортовом ряду в весьма близких диапазонах значений – 9455–13058 и 10081–12989 мг/100 г соответственно. Доминирующее положение в их биофлавоноидном комплексе принадлежало антоциановым пигментам, суммарное содержание которых в эти годы составляло 6344–9152 и 6240–9412 мг/100 г соответственно и на долю которых в нем приходилось 67–73 и 62–75 % общего количества Р-витаминов. При этом содержание собственно антоцианов, превышавшее таковое лейкоантоцианов в годы наблюдений в 1,1–2,2 и в 1,9–2,8 раза, изменялось в диапазонах 3720–6240 и 4440–6680 мг/100 г, лейкоантоцианов – 2264–4317 и 1800–4732 мг/100 г, флавонолов – 2035–3083 и 2095–3031 мг/100 г при колебании долевого участия последних в составе биофлавоноидного комплекса плодов в 2021 г. от 19 до 24 %, в 2022 г. – от 18 до 28 %. Наименьшей же относительной долей участия в нем, изменявшейся в таксономическом ряду в 2021 г. от 8 до 10 %, в 2022 г. – от 6 до 10 %, характеризовались катехины, содержание которых варьировалось в эти годы в диапазонах 849–1031 и 754–1118 мг/100 г соответственно при содержании дубильных веществ 2,10–3,06 и 2,62–3,47 %.

Таблица 2

Содержание фенольных соединений в сухой массе плодов интродуцированных сортов *Lonicera edulis* в условиях сезона 2021 г.

Table 2

The content of phenolic compounds in the dry weight of fruits of introduced varieties of *Lonicera edulis* in the conditions of the 2021 season

Сорт	Биофлавоноиды, мг/100 г							
	собственно антоцианы		лейкоантоцианы		сумма антоциановых пигментов		катехины	
	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>
<i>Ленинградский великан</i>	4800,0 ± 92,4		4317,3 ± 156,3		9117,3 ± 69,3		1014,0 ± 14,0	
<i>Aurora</i>	3720,0 ± 46,2	-10,5*	3196,0 ± 106,2	-5,9*	6916,0 ± 60,0	-24,0*	1022,7 ± 48,3	0,2
<i>Zojka</i>	5480,0 ± 46,2	6,6*	3672,0 ± 54,5	-3,9*	9152,0 ± 60,0	0,4	1022,7 ± 48,3	0,2
<i>Wojtek</i>	6160,0 ± 46,2	13,2*	2784,0 ± 13,9	-9,8*	8944,0 ± 60,0	-1,9	1031,3 ± 52,7	0,3
<i>Indigo gem</i>	6240,0 ± 46,2	13,9*	2912,0 ± 54,5	-8,5*	9152,0 ± 60,0	0,4	996,7 ± 22,9	-0,6
<i>Honey bee</i>	4080,0 ± 46,2	-7,0*	2264,0 ± 13,0	-13,1*	6344,0 ± 60,0	-30,2*	849,3 ± 45,9	-3,4*
Сорт	Биофлавоноиды, мг/100 г						Дубильные вещества, %	
	флавонолы		флавонолы / катехины		сумма			
	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>
<i>Ленинградский великан</i>	2445,3 ± 14,8		2,4 ± 0,1		12576,7 ± 66,7		2,10 ± 0,01	
<i>Aurora</i>	2034,9 ± 38,1	-10,0*	2,0 ± 0,1	-5,4*	9973,5 ± 83,7	-24,3*	2,31 ± 0,01	12,9*
<i>Zojka</i>	2523,9 ± 6,9	4,8*	2,5 ± 0,1	0,6	12698,6 ± 87,7	1,1	3,06 ± 0,01	58,8*
<i>Wojtek</i>	3082,9 ± 38,1	15,6*	3,0 ± 0,1	4,2*	13058,2 ± 106,6	3,8*	2,73 ± 0,01	33,8*
<i>Indigo gem</i>	2820,9 ± 38,1	9,2*	2,8 ± 0,1	3,7*	12969,5 ± 69,0	4,1*	2,12 ± 0,01	0,8
<i>Honey bee</i>	2261,9 ± 23,1	-6,7*	2,7 ± 0,1	2,9*	9455,3 ± 83,4	-29,2*	2,91 ± 0,02	31,4*

Примечание. *Статистически значимые по *t*-критерию Стьюдента различия со стандартным сортом при *p* < 0,05.

Содержание фенольных соединений в сухой массе плодов интродуцированных сортов *Lonicera edulis* в условиях сезона 2022 г.

Table 3

The content of phenolic compounds in the dry weight of fruits of introduced *Lonicera edulis* varieties under the conditions of the 2022 season

Сорт	Биофлавоноиды, мг/100 г							
	собственно антоцианы		лейкоантоцианы		сумма антоциановых пигментов		катехины	
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>
<i>Ленинградский великан</i>	4680,0 ± 41,6		4732,0 ± 12,9		9412,0 ± 35,9		988,0 ± 16,3	
<i>Aurora</i>	4820,0 ± 10,0	3,3*	2486,0 ± 265,1	-8,5*	7306,0 ± 260,0	-8,0*	962,0 ± 52,0	-0,5
<i>Zojka</i>	6080,0 ± 144,2	9,3*	3072,0 ± 155,6	-10,6*	9152,0 ± 28,9	-5,6*	1118,0 ± 16,3	5,6*
<i>Wojtek</i>	6680,0 ± 105,8	17,6*	2394,0 ± 50,3	-45,0*	9074,0 ± 55,6	-5,1*	884,0 ± 4,0	-6,2*
<i>Indigo gem</i>	4440,0 ± 46,2	-3,9*	1800,0 ± 163,2	-17,9*	6240,0 ± 135,1	-22,7*	1014,0 ± 1,2	1,6
<i>Honey bee</i>	6120,0 ± 192,9	7,3*	3110,0 ± 185,6	-8,7*	9230,0 ± 9,5	-4,9*	754,0 ± 26,0	-7,6*
Сорт	Биофлавоноиды, мг%						Дубильные вещества, %	
	флавонолы		флавонолы / катехины		сумма			
	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>
<i>Ленинградский великан</i>	2350,2 ± 1,1		2,38 ± 0,04		12750,2 ± 52,2		2,93 ± 0,01	
<i>Aurora</i>	2094,7 ± 52,2	-4,9*	2,19 ± 0,11	-1,7	10362,7 ± 187,1	-12,3*	2,62 ± 0,02	-12,0*
<i>Zojka</i>	2452,7 ± 27,7	3,7*	2,20 ± 0,06	-2,7	12722,7 ± 40,4	-0,4	3,47 ± 0,01	33,1*
<i>Wojtek</i>	3031,4 ± 34,1	20,0*	3,43 ± 0,05	15,7*	12989,4 ± 84,4	2,4	3,12 ± 0,02	7,4*
<i>Indigo gem</i>	2827,0 ± 74,2	6,4*	2,79 ± 0,08	4,8*	10081,0 ± 208,4	-12,4*	3,04 ± 0,01	3,7*
<i>Honey bee</i>	2333,1 ± 34,1	-0,5	3,10 ± 0,10	7,0*	12317,1 ± 47,0	-6,2*	3,29 ± 0,03	12,5*

Примечание. *Статистически значимые по *t*-критерию Стьюдента различия со стандартным сортом при $p < 0,05$.

Нетрудно убедиться в наличии заметных колебаний как в таксономическом ряду исследуемых сортов жимолости съедобной, так и в двулетнем цикле наблюдений не только количественного содержания, но и соотношения основных групп биофлавоноидов, что однозначно свидетельствовало о выраженной зависимости данных показателей не только от генотипа растений, но и от гидротермического режима вегетационного периода. Вместе с тем, как следует из табл. 4, в первый год наблюдений все новые интродуцированные сорта жимолости съедобной превосходили стандартный сорт *Ленинградский великан* по содержанию в плодах дубильных веществ на 10–46 % при наибольших различиях у сорта *Zojka* и наименьших у сорта *Indigo gem*. Что касается биофлавоноидов, то для сортов *Wojtek* и *Indigo gem* было показано превышение на 3–4 % эталонного уровня накопления данных соединений при отсутствии значимых различий в этом плане у сорта *Zojka*. Наиболее выразительные, причем сходные по величине, различия с сортом *Ленинградский великан* в общем количестве Р-витаминов, свидетельствовавшие об отставании от него на 21–25 %, были выявлены лишь у двух сортов – *Aurora* и *Honey bee*. Данные различия в основном были обусловлены на 24–30 % менее активным накоплением антоциановых пигментов, занимающих лидирующее положение в составе биофлавоноидного комплекса плодов жимолости.

Наряду с этим у первого тестируемого таксона отмечено отставание на 17 % от эталонного сорта также в содержании флавонолов, тогда как у второго – на 8 и 16 % в таковом не только флавонолов, но и катехинов, что заметно усиливало отрицательное влияние меньшего, чем у сорта *Ленинградский великан*, содержания антоцианов, на общий выход полифенолов. Заметим, что обеднение плодов этих сортов жимолости, особенно *Honey bee*, антоциановыми пигментами в большей степени было связано с ингибированием биосинтеза лейкоантоцианов, нежели собственно антоцианов, тогда как для остальных тестируемых сортов была показана активизация накопления собственно антоцианов на 14–30 %, сопровождавшаяся идентичным по темпам ослаблением такового лейкоантоцианов, что в совокупности приводило к нивелированию различий с эталонным объектом по общему содержанию данных соединений. При этом у большинства

тестируемых сортов жимолости съедобной (кроме сорта *Honey bee*) также не было выявлено значимых различий с сортом *Ленинградский великан* по содержанию катехинов. Однако у трех сортов – *Zojka*, *Wojtek* и *Indigo gem* установлено на 3–26 % более активное, чем у него, накопление в плодах флавонолов – второй по значимости у данного вида группы Р-витаминов, наиболее существенное у сорта *Wojtek*, что и обусловило показанное выше, хотя и незначительное, но все же достоверное превышение эталонного уровня общего выхода полифенолов.

Таблица 4

Относительные различия новых интродуцированных сортов *Lonicera edulis* со стандартным районированным сортом *Ленинградский великан* по характеристикам биохимического состава плодов в годы исследований, %

Table 4

Relative differences between the new introduced varieties of *Lonicera edulis* and the standard zoned variety *Leningradsky giant* according to the characteristics of the biochemical composition of fruits during the years of research, %

Показатель	<i>Aurora</i>	<i>Zojka</i>	<i>Wojtek</i>	<i>Indigo gem</i>	<i>Honey bee</i>
2021 г.					
Собственно антоцианы	-22,5	+14,2	+28,3	+30,0	-15,0
Лейкоантоцианы	-26,0	-14,9	-35,5	-32,6	-47,6
Сумма антоциан. пигментов	-24,1	–	–	–	-30,4
Катехины	–	–	–	–	-16,2
Флавонолы	-16,8	+3,2	+26,1	+15,4	-7,5
Сумма биофлавоноидов	-20,7	-	+3,8	+3,1	-24,8
Дубильные вещества	+10,0	+45,7	+30,0	–	+38,6
2022 г.					
Собственно антоцианы	+3,0	+29,9	+42,7	-5,1	+30,8
Лейкоантоцианы	-47,5	-35,1	-49,4	-62,0	-34,3
Сумма антоциан. пигментов	-22,4	-2,8	-3,6	-33,7	-1,9
Катехины	–	+13,2	-10,5	–	-23,7
Флавонолы	-10,9	+4,4	+29,0	+20,3	–
Сумма биофлавоноидов	-18,7	–	–	-20,9	-3,4
Дубильные вещества	-10,6	+18,4	+6,5	+3,8	+12,3

Примечание: Прочерк означает отсутствие статистически значимых по *t*-критерию Стьюдента различий со стандартным сортом при $p < 0,05$.

Как следует из табл. 4, на фоне погодных условий вегетационного периода 2022 г., как и годом ранее, большинство тестируемых объектов превосходили сорт *Ленинградский великан* по содержанию в плодах дубильных веществ на 7–18 %, собственно антоцианов на 3–43 % и флавонолов на 4–29 %. При этом более контрастно, чем годом ранее, проявилось отставание тестируемых объектов от сорта *Ленинградский великан* по содержанию в плодах лейкоантоцианов на 35–62 %, наиболее значительное у сорта *Indigo gem*. Заметим, что, в отличие от предыдущего сезона, во второй год исследования у сорта *Zojka* наблюдалась активизация на 13 % накопления в плодах катехинов по сравнению с эталонным объектом и отставание от него сорта *Wojtek* по данному признаку на 11 % на фоне установленного годом ранее отсутствия различий с ним у сортов *Aurora* и *Indigo gem* и отставания от него в этом плане на 24 % у сорта *Honey bee*.

Наряду с этим нашли подтверждение выявленные в предыдущем сезоне различия тестируемых объектов с эталонным сортом по содержанию в плодах флавонолов, проявившиеся в более активном – на 4–29 %, особенно у сорта *Wojtek*, их накоплении и наименее активном – у сорта *Aurora*. Вместе с тем в направленности и степени различий сортов *Aurora*, *Zojka* и *Wojtek* с сортом *Ленинградский великан* в общем содержании биофлавоноидов установлено отчетливое сходство с предыдущим сезоном, тогда как показанное выше обеднение антоцианового комплекса плодов сорта *Indigo gem* обусловило его отставание от эталонного объекта по данному признаку на 21 %. Активизация же биосинтеза собственно антоцианов в плодах сорта *Honey bee* привела к заметному ослаблению подобного отставания с 25 до 3 % по сравнению с предыдущим сезоном (см. табл. 4).

Отметим, что погодные условия вегетационного периода оказывали значительное влияние на темпы биосинтеза фенольных соединений в плодах жимолости съедобной, о степени которого можно судить по данным табл. 5.

Межсезонные (2022–2021 гг.) различия показателей накопления фенольных соединений в плодах интродуцированных сортов *Lonicera edulis*, %

Table 5

Off-season (2022–2021) differences in the accumulation of phenolic compounds in fruits of introduced varieties *Lonicera edulis*, %

Показатель	<i>Ленинградский великан</i>	<i>Aurora</i>	<i>Zojka</i>	<i>Wojtek</i>	<i>Indigo gem</i>	<i>Honey bee</i>
Собственно антоцианы	–	+29,6	+10,9	+8,4	-28,8	+50,0
Лейкоантоцианы	+9,6	-22,2	-16,3	-14,0	-38,2	+37,4
Сумма антоцианового пигмента	–	+5,6	–	–	-31,8	+45,5
Катехины	–	-5,9	+9,3	-14,3	–	-11,2
Флавонолы	–	–	–	–	–	–
Сумма биофлавоноидов	–	–	–	–	-22,3	+30,3
Дубильные вещества	+39,5	+13,4	+13,4	+14,3	+43,4	+13,1
Суммарный эффект	+49,1	+20,5	+17,3	-5,6	-77,7	+165,1

Примечание: Прочерк означает отсутствие статистически значимых по *t*-критерию Стьюдента межсезонных различий при $p < 0,05$.

Вместе с тем у большинства таксонов обнаружена явная общность тенденций в характере межсезонных различий параметров их накопления. Так, в 2022 г. пониженный и весьма неравномерный температурный фон в период формирования плодов жимолости способствовал их обогащению по сравнению с предыдущим сезоном на 8–50 % собственно антоцианами и на 13–43 % дубильными веществами, наиболее значительному в первом случае у сорта *Honey bee*, во втором – у сортов *Ленинградский великан* и *Indigo gem*, у которого наблюдалось обеднение плодов на 29 % не только собственно антоцианами, но и наиболее выраженное в таксономическом ряду (на 38 %) лейкоантоцианами, активизация накопления которых выявлена лишь у сортов *Ленинградский великан* и *Honey bee*. При этом у сортов *Aurora*, *Zojka* и *Wojtek* изменения в содержании в плодах собственно антоцианов и лейкоантоцианов отличались противоположной направленностью, что обусловило нивелирование межсезонных различий в суммарном количестве антоциановых пигментов. Подобная картина, обусловленная незначительным усилением накопления лейкоантоцианов на фоне отсутствия значимых межсезонных различий в содержании собственно антоцианов, наблюдалась и у районированного сорта *Ленинградский великан*. Лишь у двух таксонов жимолости – *Aurora* и особенно у *Honey bee* погодные условия второго сезона способствовали обогащению антоцианового комплекса плодов на 6 и 46 % соответственно относительно предыдущего сезона.

Для параметров накопления второго по значимости компонента биофлавоноидного комплекса плодов – флавонолов ни в одном случае не было установлено достоверных межсезонных различий. Что касается катехинов, то влияние погодных условий на их содержание в основном было маловыразительным и неоднозначным, а у сортов *Ленинградский великан* и *Indigo gem* оно и вовсе не нашло статистического подтверждения. Наличие в ряде случаев разнонаправленных тенденций в изменении темпов биосинтеза компонентов антоцианового комплекса под действием абиотических факторов при незначительном их влиянии на таковые катехинов и особенно флавонолов объясняет отсутствие у большинства таксонов жимолости значимых межсезонных различий в общем содержании в плодах биофлавоноидов. Лишь в двух случаях – у сортов *Indigo gem* и *Honey bee* влияние погодных условий второго сезона на их накопление оказалось весьма выразительным и противоположным по знаку, что подтверждалось обеднением плодов первого таксона и обогащением второго на 22 и 30 % соответственно относительно предыдущего сезона.

При столь разноплановой картине влияния погодных условий вегетационного периода на накопление фенольных соединений в плодах исследуемых сортов жимолости съедобной для интегральной оценки степени данного влияния был определен суммарный эффект. С этой целью для каждого таксона было осуществлено суммирование относительных размеров межсезонных различий исследуемых показателей с учетом их знака. Как следует из табл. 5, у большинства сортов значения данного показателя имели положительную направленность, варьируясь от 17 у сорта *Zojka* до 165 % у сорта *Honey bee*, что свидетельствовало о преобладании позитивного влияния гидротермического режима второго сезона на совокупность исследуемых биохимических характеристик их плодов. Вместе с тем для двух сортов жимолости – *Wojtek* и особенно *Indigo gem* влияние на нее данного фактора в этом плане оказалось неблагоприятным, поскольку значения суммарного эффекта, составлявшие соответственно 6 и 78 %, имели отрицательную направленность, что свидетельствовало об определенном обеднении фенольного комплекса их плодов. Вместе с тем нельзя не признать, что наименее

выраженными в таксономическом ряду межсезонными различиями данного признака, несмотря на их отрицательную направленность, был отмечен сорт *Wojtek*, что указывало на наибольшую устойчивость у него спектра исследуемых показателей к воздействию погодных условий вегетационного периода.

Вместе с тем, несмотря на значительное влияние данного фактора на темпы биосинтеза в плодах фенольных соединений, в большинстве случаев в оба сезона отчетливо прослеживалась определенная общность тенденций в характере различий тестируемых сортов жимолости съедобной с эталонным сортом *Ленинградский великан* по исследуемым показателям. Это однозначно свидетельствовало об устойчивости проявления их зависимости от генотипа растений, что нашло подтверждение и при выявлении таксонов *Lonicera edulis* с наибольшими и соответственно наименьшими значениями исследуемых характеристик биохимического состава плодов (табл. 6).

Так, на фоне погодных условий 2022 г. в большинстве случаев обнаружено совпадение с установленными годом ранее подобными полярными оценками в качестве плодов интродуцированных сортов жимолости съедобной. К примеру, в таксономическом ряду подтвердилось лидирующее положение районированного сорта *Ленинградский великан* в накоплении в них лейкоантоцианов и общем количестве антоциановых пигментов. При этом весьма устойчивым в двулетнем цикле наблюдений оказалось минимальное накопление в плодах флавонолов у сорта *Aurora* и катехинов у сорта *Honey bee*. Наряду с этим, как и годом ранее, максимальным содержанием в плодах дубильных веществ и катехинов был отмечен сорт *Zojka*, а собственно антоцианов, флавонолов и Р-витаминов – сорт *Wojtek*. При этом лишь в отдельных случаях имели место межсезонные различия по данным критериям оценки качества плодов тестируемых объектов (табл. 6). Так, на фоне погодных условий вегетационного периода 2022 г. у сорта *Ленинградский великан* впервые установлено максимальное в таксономическом ряду содержание в них Р-витаминов, а у сорта *Aurora* – минимальное количество дубильных веществ. При этом у сорта *Zojka* в данном сезоне обнаружено повышение до максимального уровня, сопоставимого с таковым у сортов *Ленинградский великан* и *Wojtek*, общего количества биофлавоноидов. Наряду с этим у сорта *Indigo gem* наблюдалось снижение до минимального уровня содержания в плодах обеих групп антоциановых пигментов и общего количества Р-витаминов.

Таблица 6

Интродуцированные сорта *Lonicera edulis* с наибольшим (**max**) и наименьшим (**min**) в сортовом ряду содержанием в плодах фенольных соединений в годы исследований

Table 6

Introduced varieties of *Lonicera edulis* with the highest (**max**) and lowest (**min**) content of phenolic compounds in fruits in the variety range during the years of research

Показатель	Ленинградский великан	<i>Aurora</i>	<i>Zojka</i>	<i>Wojtek</i>	<i>Indigo gem</i>	<i>Honey bee</i>
2021г.						
Собственно антоцианы		<i>min</i>		max	max	
Лейкоантоцианы	max					<i>min</i>
Сумма антоциановых пигментов	max	<i>min</i>	max		max	<i>min</i>
Катехины	max	max	max	max	max	<i>min</i>
Флавонолы		<i>min</i>		max		
Сумма биофлавоноидов		<i>min</i>		max	max	<i>min</i>
Дубильные вещества	<i>min</i>		max		<i>min</i>	
2022 г.						
Собственно антоцианы				max	<i>min</i>	
Лейкоантоцианы	max				<i>min</i>	
Сумма антоциан. пигментов	max				<i>min</i>	
Катехины			max			<i>min</i>
Флавонолы		<i>min</i>		max		
Сумма биофлавоноидов	max		max	max	<i>min</i>	
Дубильные вещества		<i>min</i>	max			

Заключение

В результате сравнительного анализа в южной агроклиматической зоне Беларуси в контрастные по гидротермическому режиму сезоны 2021 и 2022 гг. параметров накопления основных групп биофлавоноидов

и дубильных веществ в плодах 5 новых интродуцированных сортов жимолости съедобной – *Aurora*, *Honeybee*, *Indigo Gem*, *Wojtek*, *Zojka* и районированного сорта *Ленинградский великан*, выбранного в качестве эталона сравнения, установлено следующее. Пониженный и весьма неравномерный температурный фон второго сезона в период формирования плодов способствовал их преимущественному обогащению по сравнению с предыдущим более теплым сезоном на 8–50 % собственно антоцианами и на 13–43 % дубильными веществами, наиболее значительному в первом случае у сорта *Honey bee*, во втором – у сортов *Ленинградский великан* и *Indigo gem*, на фоне преимущественного обеднения на 14–38 % лейкоантоцианами и в меньшей степени (на 6–14 %) катехинами при отсутствии значимых межсезонных различий в накоплении флавонолов, в большинстве случаев в общем выходе Р-витаминов. У большинства таксонов жимолости, особенно у сорта *Honey bee*, установлено позитивное влияние неблагоприятного температурного фона на совокупность характеристик фенольного комплекса плодов и негативное у сорта *Indigo gem* при наиболее выраженной его устойчивости к воздействию данного фактора у сорта *Wojtek*.

Несмотря на выявленные изменения в составе фенольного комплекса плодов жимолости во второй год наблюдений, обусловленные погодными условиями периода их формирования, в большинстве случаев в оба сезона отчетливо прослеживалась определенная общность тенденций в характере различий тестируемых объектов с эталонным сортом *Ленинградский великан* по исследуемым показателям, что однозначно свидетельствовало об устойчивости проявления их зависимости от генотипа растений.

Библиографические ссылки

1. Рупасова ЖА, и др. Влияние погодных условий вегетационного периода на биохимический состав плодов шиповника и калины обыкновенной при интродукции в Беларусь. *Плодоводство*. 2013;25:309–325.
2. Рупасова ЖА, и др. Межсезонные различия биохимического состава плодов рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) при интродукции в Беларусь. *Плодоводство*. 2016;28:227–236.
3. Карabanов ИА. *Флавоноиды в мире растений*. Минск: Ураджай; 1981. 80 с.
4. Swain T, Hillis W. The phenolic constituents of *Prunus Domenstica*. 1. The quantitative analysis of phenolic constituents. *Journal Science Food Agriculture*. 1959;10(1):63–68.
5. Скорикова ЮГ, Шафтан ЭА. Методика определения антоцианов в плодах и ягодах. В: *Труды 3 Всесоюзного семинара по биологически активным (лечебным) веществам плодов и ягод*. Свердловск: [б. и.]; 1968. с. 451–461.
6. Андреев ВЮ, и др. Методика определения антоцианов в плодах аронии черноплодной. *Фармация*. 2013;3:19–21.
7. Ермаков АИ, редактор. *Методы биохимического исследования растений*. Ленинград: [б. и.]; 1987. 430 с.
8. Определение содержания дубильных веществ в лекарственном растительном сырье. Общие методы анализа. *Государственная фармакопея СССР. Медицина*. Москва: [б. и.]; 1987. с. 286–287.

References

1. Rupasova ZhA, et al. Influence of weather conditions of the growing season on the biochemical composition of rose hips and *viburnum vulgare* during introduction to Belarus. *Plodovodstvo*. 2013;25:309–325. Russian.
2. Rupasova ZhA, et al. Interseasonal differences in the biochemical composition of the fruits of mountain ash (*Sorbus aucuparia* L.) when introduced into Belarus. *Plodovodstvo*. 2016;28:227–236. Russian.
3. Karabanov IA. *Flavonoids in the plant world*. Minsk: Urajay; 1981. 80 p. Russian.
4. Swain T, Hillis W. The phenolic constituents of *Prunus Domenstica*. 1. The quantitative analysis of phenolic. *Journal Science Food Agriculture*. 1959;10(1):63–68.
5. Skorikova YuG, Shaftan EA. Method for determining anthocyanins in fruits and berries. In: *Trudy 3 All-Union. seminar on biologically active (medicinal) substances of fruits and berries*. Sverdlovsk: [publisher unknown]; 1968. p. 451–461. Russian.
6. Andreev VYu, et al. Method for determination of anthocyanins in the fruits of black chokeberry. *Farmactsia* [Pharmacy]. 2013;3:19–21. Russian.
7. Ermakov AI, editor. *Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy* [Methods of biochemical research of plants]. Leningrad: [publisher unknown]; 1987. 430 p. Russian.
8. Determination of the content of tannins in medicinal plant materials. General methods of analysis. *Gosudarstvennaya farmakopeya SSSR. Meditsina* [State Pharmacopoeia of the USSR. Medicine]. Moscow: [publisher unknown]; 1987. p. 286–287. Russian.

Статья поступила в редколлегию 04.01.2023.
Received by editorial board 04.01.2023.

ДЕГРАДАЦИЯ ЗЕМЕЛЬ КАК ОБЪЕКТ СУДЕБНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

С. С. ПОЗНЯК¹⁾

¹⁾Научно-практический центр Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь,
ул. Филимонова, 25, 220114, г. Минск, Беларусь

Посредством хозяйственной деятельности компоненты окружающей среды подвергаются прямому или косвенному антропогенному воздействию, в результате которого происходит, как правило, изменение функций, состава, свойств и режимов почвы, снижается ее природно-хозяйственная значимость, что в ряде случаев приводит к деградации земель. Анализ следственной и экспертной практики свидетельствует, что в судебном производстве существенную часть занимают материалы, связанные с деградацией земель в результате нарушения природоохранного законодательства по статьям 267, 269, 270 Уголовного кодекса Республики Беларусь, статьям 6.10, 6.11, 6.15 Кодекса Республики Беларусь об административных правонарушениях. В исследовании приводится пример из практики проведения судебной экспертизы. При незаконном проведении работ по раскопке земель в прибрежной полосе водоема окружающей среде причиняется вред по причине деградации земель (включая почвы). С целью установления всех обстоятельств экологического правонарушения и в соответствии со статьями 226, 227, 228 УПК Республики Беларусь назначена судебная экологическая экспертиза объектов почвенно-геологического происхождения. В связи с давностью исследуемого события и принципиальным изменением материальной обстановки на земельных участках, экспертиза проводилась путем изучения материалов, предоставленных с постановлением о назначении экспертизы, анализа нормативной, нормативно-технической, специальной технической документации в области охраны окружающей природной среды, проведения экспертного осмотра, ситуационного анализа, сравнения результатов исследования с требованиями нормативной, нормативно-технической, специальной технической документации и фактическими данными, которые обусловили возникновение исследуемого события, а также по результатам экспертного осмотра места экологического правонарушения.

В ходе проведения исследований установлены обстоятельства конкретного экологического правонарушения и даны ответы на вопросы органа, производящего дознание. Показано, что на земельном участке, предоставленном для ведения сельскохозяйственного производства, плодородный слой земли (почвы) не уничтожен, его мощность соответствует среднестатистическим значениям мощности плодородных горизонтов для почв данной типовой принадлежности. Факт деградации земель (включая почвы), истощения, повреждения, уничтожения или иного ухудшения их состояния по причине хозяйственной деятельности на земельном участке не выявлен. В результате ведения сельскохозяйственного производства на земельном участке вред окружающей среде не причинен, поскольку исходный рельеф местности не изменялся, деградация земель (почв) не выявлена, повреждения плодородного слоя почвы и травянистого растительного покрова не произошли. При ведении хозяйственной деятельности допущено нарушение правил охраны окружающей среды: п. 1.7, ст. 53, гл. 11 Водного кодекса Республики Беларусь – устройство летних лагерей для сельскохозяйственных животных в границах водоохраных зон, прибрежных полос и абз. 4, ч. 1, ст. 89 Кодекса Республики Беларусь о земле – загрязнение отходами производства и потребления.

Ключевые слова: судебная экологическая экспертиза объектов почвенно-геологического происхождения; деградация земель; экспертный осмотр; плодородный слой почвы; несанкционированная свалка; захламленность; пойменный луг; гумус; окружающая среда; причинение вреда окружающей среде.

Образец цитирования:

Позняк СС. Деградация земель как объект судебной экологической экспертизы. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;1:90–101.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-90-101>

For citation:

Pazniak SS. Land degradation as an object of forensic environmental expertise. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;1:90–101. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-90-101>

Автор:

Сергей Степанович Позняк – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории исследования материалов, веществ и изделий научного отдела технических, криминалистических и специальных исследований.

Author:

Siarhei S. Pazniak, doctor of science (agriculture), full professor, chief researcher of the laboratory for study of materials, substances and products of the scientific department of technical, forensic and special research.
sspazniak@gmail.com

LAND DEGRADATION AS AN OBJECT OF FORENSIC ENVIRONMENTAL EXPERTISE

S. S. PAZNIAK^a

^aScientific and Practical Centre of the State Forensic Examination Committee of the Republic of Belarus,
25 Filimonava Street, Minsk 220114, Belarus

As a result of economic activity, the components of the environment are exposed to direct or indirect anthropogenic impact, as a result of which, as a rule, the functions, composition, properties and regimes of the soil change, its natural and economic significance decreases, i.e. soil degradation occurs. An analysis of investigative and expert practice shows that in court proceedings a significant part is occupied by materials related to land degradation as a result of violations of environmental legislation under Art. Art. 267, 269, 270 of the Criminal Code of the Republic of Belarus, art. art. 6.10, 6.11, 6.15 of the Code of the Republic of Belarus on Administrative Offenses.

The article provides an example from the practice of conducting a forensic examination. As a result of illegal excavation of land in the coastal strip of the reservoir, the environment was harmed due to land degradation (including soil). In order to establish all the circumstances of the environmental offense and the truth in the case, in accordance with art. art. 226, 227, 228 of the Code of Criminal Procedure of the Republic of Belarus, a forensic environmental examination of objects of soil-geological origin was appointed. In connection with the prescription of the event under study and the fundamental change in the material situation on the land plots, the examination was carried out by studying the materials provided with the decision to appoint an examination, analyzing the normative, normative-technical, special technical documentation in the field of environmental protection, situational analysis, comparing the results studies with the requirements of normative, normative-technical, special technical documentation and actual data that caused the occurrence of the event under study, as well as based on the results of an expert examination of the site of an environmental offense.

In the course of the research, the circumstances of a specific environmental offense were established and answers were given to the questions of the body conducting the inquiry. It is shown that on the land plot provided for agricultural production, the fertile layer of the earth (soil) is not destroyed, its thickness corresponds to the average statistical values of the thickness of fertile horizons for soils of this type. The facts of land degradation (including soils), depletion, damage, destruction or other deterioration of their condition due to economic activities on the land plot have not been identified. As a result of agricultural production on the land plot, no harm was caused to the environment, since the original terrain did not change, land (soil) degradation was not detected, and damage to the fertile soil layer and grassy vegetation did not occur. When conducting business activities, violations of the rules of environmental protection were committed: clause 1.7, article 53, chapter 11 of the Water Code of the Republic of Belarus - arrangement of summer camps for farm animals within the boundaries of water protection zones, coastal strips and para. 4, part 1, article 89 of the Code of the Republic of Belarus on Land - pollution by production and consumption waste.

Keywords: forensic ecological examination of objects of soil-geological origin; land degradation; expert examination; fertile soil layer; unauthorized dump; littering; floodplain meadow; humus; environment; environmental damage.

Введение

В результате хозяйственной деятельности компоненты окружающей среды подвергаются прямому или косвенному антропогенному воздействию, приводящему, как правило, к изменению функций, состава, свойств и режимов почвы, снижению ее природно-хозяйственной значимости, а в ряде случаев наблюдается деградация почв [1]. Деградация почв включает следующие основные типы: технологическая (эксплуатационная), эрозия почвы (ветровая, водная), засоление и заболачивание земель¹. В условиях Республики Беларусь при нарушении экологических нормативов наиболее распространенным типом является технологическая (эксплуатационная) деградация, к которой относится механическое разрушение почвенного покрова, обусловленное открытыми и закрытыми разработками полезных ископаемых и торфа, строительными и геолого-разведочными работами (все земли со снятым или перекрытым гумусовым горизонтом и непригодные для использования без предварительного восстановления плодородия); физическая (земледельческая) деградация – нарушение сложения почв и ухудшение комплекса их физических свойств, водно-воздушного и других режимов, физических условий существования почвенной биоты и растений (обусловлено низкой культурой земледелия); агроистощение (потеря почвенного плодородия в результате обеднения почв элементами минерального питания, неблагоприятных изменений почвенного поглощающего комплекса, реакции среды, обеднения минералогического состава, избыточного облегчения или утяжеления гранулометрического состава, уменьшения содержания и ухудшения качества органического вещества, развития неблагоприятного

¹Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель [Электронный ресурс]. Письмо Роскомзема от 27.03.1995 № 3-15/582. URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=6629> (дата обращения: 23.01.2023).

комплекса почвенной биоты (обусловлено нарушением системы земледелия при возделывании культур в сельскохозяйственном производстве).

Анализ следственной и экспертной практики показывает, что в судебном производстве существенную часть занимают материалы, связанные с деградацией земель в результате нарушения природоохранного законодательства по ст. 267, 269, 270 Уголовного кодекса Республики Беларусь, ст. 6.10, 6.11, 6.15 Кодекса Республики Беларусь об административных правонарушениях.

Результаты проводимых судебных экспертиз имеют существенное значение для раскрытия и расследования экологических правонарушений, поскольку позволяют определить важные фактические обстоятельства, связанные с событием на месте происшествия. Вместе с тем возможности экспертизы в достаточной степени не используется, что обусловлено невысоким уровнем информированности сотрудников следственных аппаратов о возможностях данной экспертизы, порядке ее назначения, правилах изъятия сравнительных и контрольных образцов, а также недостаточным количеством экспертов, имеющих право самостоятельного производства экспертиз.

В судебной практике достаточно часто встречаются уголовные и административные дела по фактам загрязнения почвенного покрова. При расчете вреда, причиненного окружающей среде, в результате нарушения природоохранного законодательства, как правило, одной из наиболее распространенных форм причинения вреда является деградация земель. Главным фактором деградации земель (включая почвы), оказывающим непосредственное влияние на экологическое состояние, является антропогенный характер отрицательного воздействия, включающий в себя как необоснованное интенсивное землепользование, так и несоблюдение норм законодательства об охране и использовании земель. Причем в материалах дел понятие «деградация земель» не всегда правильно интерпретируется и применяется. Зачастую речь должна идти не о «деградации земель», а о нарушении других норм и правил. Цель исследования – анализ конкретного примера из судебной практики, где по материалам дела рассматривалось причинение вреда окружающей среде посредством деградации земель. При проведении судебной экологической экспертизы объектов почвенно-геологического происхождения показано, что деградация земель (включая почвы) не произошло.

Согласно установочной части постановления о назначении экспертизы был выявлен факт порчи земель, заключающийся в том, что в прибрежной полосе водоема построены загоны и осуществляется содержание животных. По сведениям Геопортала земельно-информационной системы Республики Беларусь, территория, на которой осуществлено нарушение земель, представлена следующими категориями: земли сельскохозяйственного назначения (под древесно-кустарниковой растительностью); земли лесного фонда (лесные земли). Глубина выемки земель составляет от 1 до 2 м.

При обследовании земельного участка выявлено:

1. В прибрежной полосе водоема устроены загоны и содержатся животные, что нарушает п. 1 ст. 54 Водного кодекса Республики Беларусь.

2. Вдоль леса установлено ограждение, в результате чего произошло самовольное занятие земельного участка.

3. Не выполнены иные требования по охране земель, а именно, ч. 1 ст. 89 Кодекса Республики Беларусь о земле (не сохранены плодородие почвы и иные полезные свойства земель путем проведения работ по выемке, перемещению грунта без получения соответствующего разрешения (при этом в постановлении указывается, что отсутствуют следы снятия верхнего слоя (плодородного) в местах проведения работ, его перемещения). Таким образом, вышеуказанными действиями нарушены требования, установленные абз. 3 ч. 1 ст. 70, абз. 1–3 ч. 1 ст. 89 Кодекса Республики Беларусь о земле; п.п. 1.1 ст. 54 Водного кодекса Республики Беларусь.

Согласно установочной части постановления о назначении экспертизы в результате незаконного проведения работ по раскопке земель в прибрежной полосе водоема, окружающей среде причинен вред по причине деградации земель (включая почвы) любой категории. В копии материалов дела информация об исходном состоянии почвенного и растительного покрова (как древесно-кустарникового, так и травянистого и мохового) на месте происшествия отсутствует. Признаков осуществления раскопок и перемещения грунта на представленных эксперту фотоизображениях не имеется.

С целью установления всех обстоятельств экологического правонарушения, в соответствии со ст. 226, 227, 228 УПК Республики Беларусь, назначена судебная экологическая экспертиза объектов почвенно-геологического происхождения.

Материалы и методы исследования

С целью уточнения имеющихся в деле данных и получения дополнительных сведений о возможном негативном антропогенном воздействии на почвенный покров проведен экспертный осмотр места

экологического правонарушения. На начальном этапе произведен общий осмотр территории без изменения обстановки на месте происшествия, который включал описание метеоусловий (температура воздуха, наличие атмосферных осадков и др.), «привязку» к ориентирам на местности, определение границ негативного воздействия и характера подлежащей осмотру территории [2].

Осмотр проводился при естественном освещении, погодные условия благоприятные: облачно, без осадков, температура воздуха +10 °С. Характер подлежащей осмотру территории места экологического правонарушения «привязан» от стационарных объектов – линии электропередачи. Территория лесного массива, непосредственно прилегающая к месту происшествия, не осматривалась.

Границы места потенциального негативного воздействия экологического правонарушения устанавливались по линии столбов заборного ограждения (рис. 1), а также непосредственно по характерным визуальным признакам.



Рис. 1. Граница участка, примыкающая к лесному массиву (фото автора)

Fig. 1. The border of the site adjacent to the forest (photo by author)

Размер и форма участка принимались в соответствии с материалами, поступившими эксперту с постановлением о назначении судебной экспертизы. Характер подлежащей осмотру территории представлен следующими элементами: пойменный луг; река; пруд (искусственный водоем), устроенный в русле реки; остатки фундамента животноводческого строения; распаханый участок поля.

Целевая категория земель – земли сельскохозяйственного назначения, вид земель – древесно-кустарниковая растительность; земли лесного фонда, вид земель – лесные земли. Тип землепользования: на участке, примыкающем к реке, – пойменный луг; на участке, примыкающем к лесному массиву, – вспаханное поле [3; 4].

Земельный участок имеет ограничения (обременения) прав в использовании земель: земельные участки, расположенные в водоохранных зонах рек и водоемов (код 2,4); земельные участки, расположенные в прибрежных полосах рек и водоемов (код 2,5). Для водных объектов, для которых не утверждены в установленном порядке проекты водоохранных зон и прибрежных полос, минимальные размеры водоохранных зон и прибрежных полос приняты в соответствии с требованиями Водного кодекса Республики Беларусь².

Экспертный осмотр проводился фронтальным способом. Установлено, что на границе пойменного луга и распаханного участка поля находятся остатки фундамента разрушенного животноводческого строения. Территория вокруг фундамента представляет собой антропогенно-преобразованный для нужд животноводства участок местности, длительно не используемый в хозяйственных целях, на котором произрастает древесно-кустарниковая растительность – береза повислая, ольха черная, а также многолетняя рудеральная растительность – полынь обыкновенная, полынь горькая, золотарник канадский и др.

²Водный кодекс Республики Беларусь: 14 апр. 2014 г., № 143-З: (с изм. и доп.) [Электронный ресурс] // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. URL: <https://etalonline.by/docjoument/?regnum=hk1400149> (дата обращения: 23.01.2023).

На участке имеется несанкционированная свалка отходов производства и потребления, а также перемешанный с мусором и поросший сорной растительностью сбуртованный штабель грунта.

Участок местности между фундаментом животноводческого строения и опушкой леса в границах до линии бетонных столбов представляет собой распаханное и закультивированное поле (см. рис. 1). Форма рельефа выравненная, пологая, имеет незначительный уклон поверхности в сторону реки. Почва дерново-подзолистая слабдеформированная с признаками проведения рекультивационных работ – наличие камней, остатков корневой системы древесно-кустарниковой растительности. В почвенном горизонте на глубине пахотного слоя присутствуют включения торфокрошки, что характерно для площадок выгулов животных на территории их содержания.

На распаханном и закультивированном участке присутствует плодородный слой земли (почвы) с мощностью до 20 см, что соответствует среднестатистическим значениям мощности плодородных горизонтов для почв данной типовой принадлежности. Почва избыточно переувлажнена, в некоторых местах имеются лужи. Пеший обход и осмотр территории затруднены по причине вязкости. Проективное покрытие растительностью почвы определяется визуально величиной до 20 %. Состояние растительного покрова изреженное, видовой состав представлен сеgetальными растениями, присущими для почв сельскохозяйственных угодий – одуванчик лекарственный, ромашка непахучая, пырей обыкновенный, канатник Теофраста.

Участок распаханного поля на площади до 20 % частично захламлен инородным материалом – пластиковыми бутылками, пленкой, резиновыми отходами, обломками кирпича, корнями древесно-кустарниковой растительности, автомобильными шинами. В соответствии с ТКП 651-2020 (33520) морфологическое строение почвы со слабой степенью деформации поверхностного горизонта приравнивается к таковому в почвах нормального (ненарушенного) строения соответствующего типового и гранулометрического состава³.

В обследованном почвенном профиле отсутствуют инородные включения. Признаков и характерных следов ведения строительных работ и иных раскопок (выемки грунта, перемещений грунта) на участке распаханного поля в прибрежной полосе водотока не выявлено. Характер поверхности ровный – ям, траншей, котловин, бугров не имеется. Эрозионных форм рельефа (овраги, промоины, оползни) не наблюдается.

Признаков деградации земель (включая почвы): истощения, повреждения, уничтожения или иного ухудшения их состояния по причине ведения хозяйственной деятельности на участке распаханного поля между фундаментом животноводческого строения и опушкой леса в границах до линии бетонных столбов не имеется. Указанный участок пригоден для посева многолетних трав в соответствии с отраслевым регламентом (при соблюдении технологии возделывания).

Форма рельефа пойменного луга пологая, имеет незначительный уклон поверхности в сторону реки. Почва торфяно-болотная избыточно длительно переувлажненная в результате подтопления и застоя поверхностных вод. Почва плодородная, проективное покрытие растительностью почвы определяется визуально величиной до 100 %. Состояние растительного покрова удовлетворительное, видовой состав представлен многолетними злаковыми и бобовыми травами, а также сеgetальными растениями, присущими для луговых торфяно-болотных почв – тимopheевка луговая, мятлик обыкновенный, ежа сборная, клевер ползучий, клевер луговой, щавель конский, тысячелистник обыкновенный, одуванчик лекарственный, лапчатка, аистник цикутовый, пырей обыкновенный (рис. 2).

В границах пойменного луга построено 7 навесов для содержания животных, которые представляют собой сооружения, состоящие из вкопанных деревянных столбов, сверху накрытых шифером. Конструкции скреплены необрезной доской, имеют высоту в нижней части около 2 метров, в верхней части – около 3 м (рис. 3).

В обследованном почвенном профиле пойменного луга, а также внутри навесов инородные включения отсутствуют. Признаков и характерных следов выемки и перемещений грунта не выявлено. В отдельных местах складированы остатки необрезных досок и деревянного заборного ограждения.

Характер поверхности участка луга ровный – ям, траншей, котловин, бугров не имеется. Эрозионных форм рельефа (овраги, промоины, оползни) не наблюдается.

³ТКП 651-2020 (33520). Почвенное обследование земель и создание, обновление почвенных карт. Порядок и технология работ. Минск: Госкомимущество, 2020. 66 с.



Рис. 2. Видовое разнообразие пойменного луга (фото автора)

Fig. 2. Species diversity of the floodplain meadow (photo by author)



Рис. 3. Навес для содержания животных (фото автора)

Fig. 3. Shed for keeping animals (photo by author)

Признаков деградации земель (включая почвы), а именно истощения, повреждения, уничтожения или иного ухудшения их состояния по причине ведения хозяйственной деятельности на участке пойменного луга, а также на территории размещения навесов не имеется. Указанный участок пригоден для использования по назначению с учетом имеющихся ограничений (обременений). На участке пойменного луга производился выпас скота. Расстояние от навесов для содержания животных до береговой линии реки составляет от 30 до 50 м [5].

В ходе экспертного осмотра производилась фотосъемка цифровым фотоаппаратом «Canon EOS 700D», серийный номер 188032000947. Измерения размеров и расстояний производилось с использованием рулетки геодезической «Matrix Master» (31445), 50 м × 12,5 мм.

Результаты исследования и их обсуждение

В связи с давностью исследуемого события и принципиальным изменением материальной обстановки на земельных участках экспертиза проводилась путем изучения материалов, предоставленных с постановлением о назначении экспертизы, анализа нормативной, нормативно-технической, специальной технической документации в области охраны окружающей природной среды, проведения экспертного осмотра, ситуационного анализа, сравнения результатов исследования с требованиями нормативной, нормативно-технической, специальной технической документации и фактическими данными, которые обусловили возникновение исследуемого события, а также по результатам экспертного осмотра места экологического правонарушения.

Вопрос 1. Был ли в действительности уничтожен плодородный слой почвы и если был, то в чем выражается его уничтожение?

Для ответа на поставленный для решения вопрос следует определить, прежде всего, понятие «плодородный слой почвы».

Согласно ГОСТу 17.5.1.01-83 Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения⁴:

Плодородный слой почвы – верхняя гумусированная часть почвенного профиля, обладающая благоприятными для роста растений химическими, физическими и биологическими свойствами.

В почвоведческой литературе понятие «плодородный слой почвы» не имеет точной трактовки и определения. В составе почвы выделяются различные слои (горизонты) в зависимости от содержания в них гумуса. По ГОСТу 23740-2016⁵,

3.1 гумус: Специфическое органическое вещество, образовавшееся в процессе биохимических процессов трансформации органических остатков, преимущественно растительного происхождения – гетерогенная полидисперсная система высокомолекулярных азотсодержащих соединений: гуминовые и фульвокислоты, негидролизуемый остаток (гумин).

Говоря о «плодородном слое почвы», имеется в виду слой почвы, который является наиболее ценным и требует особой охраны из-за повышенного содержания гумуса. Особую ценность имеет плодородный слой почвы на сельскохозяйственных землях.

На торфяно-болотных почвах большое количество влаги препятствует полной минерализации органических веществ, в результате чего остатки растений и листьев, не способные до конца перегнить в кислой среде, накапливаются в верхнем слое почвы и образуют толстый пласт торфа.

Неполноценное анаэробное перегнивание с недостатком кислорода из-за высокой влажности препятствует образованию гумуса, поэтому торфяные почвы достаточно бедны полезными для растений микроэлементами, а на верхней оторфованной подстилке развиваются те виды растений, которым хватает небольшого содержания азота, фосфора и калия. Гумусированная часть почвенного профиля на заболоченных землях имеет низкую мощность, неравномерна по всей площади болота⁶.

В соответствии ТКП 17.03-05-2018 (33140)⁷:

Снятие и рациональное использование плодородного слоя почвы при проведении земельных работ следует производить на землях всех категорий.

При этом в ЭкоНиП 17.01-06-001-2017 в требованиях к охране земель (почв) при снятии, сохранении и использовании плодородного слоя почвы при проведении различных видов работ указано⁸:

4.3. Плодородный слой не снимается:

- на песчаных слаборазвитых, щебнистых, гравийно-хрящевых почвах;
- на почвах с содержанием гумуса менее 1 %, мощность плодородного слоя которых менее 10 см;
- на участках лесных земель с мощностью плодородного слоя менее 10 см.

4.4. Допускается не снимать плодородный слой почвы на заболоченных и обводненных участках.

⁴ГОСТ 17.5.1.01-83. Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения. Дата введения: 01.07.1984 [Электронный ресурс]. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/43745/> (дата обращения: 23.01.2023).

⁵ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ. Дата введения: 25.10.2016 [Электронный ресурс]. URL: <http://vsegost.com/Catalog/64/64068.shtml> (дата обращения: 23.01.2023).

⁶ТКП 651-2020 (33520). Почвенное обследование земель и создание, обновление почвенных карт. Порядок и технология работ. Издание официальное. Минск: Госкомимущество, 2020. 66 с.

⁷ТКП 17.03-05-2018 (33140). Охрана окружающей среды и природопользование. Земли. Порядок выполнения работ по определению деградации земель (почв). Общие положения. Дата введения: 01.11.2018 [Электронный ресурс]. URL: chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2022/07/17.03-05-2018_33140.pdf (дата обращения: 23.01.2023).

⁸ЭкоНиП 17.01-06-001-2017. Экологические нормы и правила [Электронный ресурс]. Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности (утверждены Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь №5-Т от 18.07.2017). URL: <https://enp.by/ehkonip-17-01-06-001-2017/> (дата обращения: 23.01.2023).

В связи с вышеизложенным, а также основываясь на результатах экспертного осмотра места экологического правонарушения, можно утверждать, что на земельном участке присутствует плодородный слой земли (почвы) с мощностью до 20 см, что соответствует среднестатистическим значениям мощности плодородных горизонтов для почв данной типовой принадлежности.

Состояние растительного покрова на исследуемом земельном участке удовлетворительное, видовой состав представлен многолетними бобово-злаковыми травами и сеgetальной растительностью, типичной для дерново-подзолистых и торфяно-болотных почв, имеет проективное покрытие от 20 до 100 % (см. рис. 2, 3), что свидетельствует о наличии благоприятных для роста растений химических, физических и биологических свойств.

Вопрос 2. Был ли факт деградации земли, включая почву?

Исследование по данному вопросу проведено на основании анализа предоставленных для проведения экспертизы материалов, а также экспертного осмотра места экологического правонарушения с учетом соответствующих требований природоохранного законодательства Республики Беларусь.

Согласно ст. 1 Кодекса Республики Беларусь о земле⁹:

... Деградация земель – процесс снижения качества земель в результате вредного антропогенного и (или) природного воздействия;

... деградированные земли – земли, потерявшие свои исходные полезные свойства до состояния, исключающего возможность их эффективного использования по целевому назначению.

Земля – охраняемый законом природный объект, поверхностный почвенный слой, являющийся связующим звеном между живой и неживой природой.

В научной литературе понятие «деградация почв» до настоящего времени не имеет четкого определения, однако в него так или иначе включаются процессы ухудшения свойств, состава почв и их качества.

В почвоведческой литературе указывается, что нарушение почв – это сложный комплекс антропогенных и природных процессов изменения физико-химических и механических характеристик почвы. Как правило, первой причиной нарушения почв являются процессы, инициированные деятельностью человека (механическая обработка почв, трансформация слоев земли в строительстве, переуплотнения почв в результате деятельности транспорта и др.).

Согласно Приложению 1, Положения, определенного Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17 июля 2008 г. № 1042¹⁰:

11. Деградация земель всех видов (включая почвы) характеризуется четырьмя степенями: низкая, средняя, высокая, очень высокая.

Степень деградации земель (включая почвы) определяется уполномоченным государственным органом или уполномоченной им организацией по каждому ее виду и одному или нескольким характеризующим его показателям, установленным в приложении 1 к настоящему Положению, при этом оценка степени деградации земель (включая почвы) проводится по показателю, устанавливающему их наибольшую степень.

Степень деградации земель определяется по показателю деградации земель (включая почвы) исходя из вида деградации земель (таблица).

В соответствии с Актом обследования земельного участка, ответчик, согласно п. 3, не выполнил иные требования по охране земель, а именно нарушил ч. 1 ст. 89 Кодекса Республики Беларусь о земле (не сохранило плодородие почвы и иные полезные свойства земель путем проведения работ по выемке, перемещению грунта на глубину более 0,45 метра без получения соответствующего разрешения (отсутствуют следы снятия верхнего слоя (плодородного) в местах проведения работ, его перемещение... Таким образом, в материалах дела не содержится достоверной информации, подтверждающей факт проведения работ по выемке и перемещению грунта на земельном участке.

В ходе экспертного осмотра места экологического правонарушения признаков деградации земель (включая почвы), а именно истощения, повреждения, уничтожения или иного ухудшения их состояния, по причине ведения хозяйственной деятельности на земельном участке не обнаружено. Характер поверхности земельного участка ровный – ям, траншей, котловин, бугров не имеется. Эрозионных форм рельефа (овраги, промоины, оползни) не наблюдается.

⁹Кодекс Республики Беларусь о Земле: 23 июля 2008 г. № 425-З (с изм. и доп.) [Электронный ресурс] // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=hk0800425> (дата обращения: 23.01.2023).

¹⁰Постановление Совета Министров Республики Беларусь «Об утверждении Положения о порядке исчисления размера возмещения вреда, причиненного окружающей среде, и составления акта об установлении факта причинения вреда окружающей среде» от 17 июля 2008 г. № 1042 [Электронный ресурс] // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=c20801042> (дата обращения: 23.01.2023).

Степень деградации земель в зависимости от показателей деградации¹¹

Degree of land degradation depending on degradation indicators¹¹

Виды деградации земель (включая почвы)	Показатели деградации земель (включая почвы)	Интервалы значений показателей по степеням деградации			
		низкая	средняя	высокая	очень высокая
7. Незаконное нарушение земель при разработке месторождений полезных ископаемых и их переработке; добыче торфа и сапропелей; ведении строительных работ и иных раскопках	Удельный вес площади контура (контуров) с испорченным (утерянным) плодородным слоем почвы в площади контура земель или земельного участка, %	1–2,5	2,6–10	11–40	>40
	Глубина промоин, рытвин, провалов и раскопок относительно поверхности, см	>20–40	>40–100	>100–200	>200

При проведении работ по раскопке земель снимается плодородный слой почвы и разрушаются подстилающие породы, нарушается геологическая естественная структура почвы местности, меняется уровень грунтовых вод, происходит уничтожение микроорганизмов (биоты), при этом нарушается ландшафт местности, уничтожается растительность, в том числе и лесная. С точки зрения эксперта-эколога, на земельном участке, предоставленном для ведения сельхозпроизводства, деградации земли (почвы) не произошло. Вкапывание деревянных столбов для 7 легковозводимых навесов для содержания животных не могло вызвать деградацию земель (почв).

Вопрос 3. Какой вред причинен окружающей среде и его масштабы?

Для ответа на поставленный вопрос следует, прежде всего, определить понятие «окружающая среда». В соответствии со ст. 1 Закона Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» от 26 ноября 1992 г. №1982-ХП (с изменениями и дополнениями)¹²:

... Окружающая среда – совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов, а также антропогенных объектов...

Поскольку данный вопрос касается экологического вреда, причиненного в результате несоблюдения правил охраны окружающей среды, следует определить и охарактеризовать понятия «вред, причиненный окружающей среде», «причинение вреда окружающей среде», «компоненты природной среды», «земля», «почва», «недра», «объекты растительного мира» [5].

По определению в ст. 1 Закона Республики Беларусь «Об охране окружающей среды»¹³:

... Вред, причиненный окружающей среде, – имеющее денежную оценку отрицательное изменение окружающей среды или отдельных компонентов природной среды, природных или природно-антропогенных объектов, выразившееся в их загрязнении, деградации, истощении, повреждении, уничтожении, незаконном изъятии и (или) ином ухудшении их состояния, в результате вредного воздействия на окружающую среду, связанного с нарушением требований в области охраны окружающей среды, иным нарушением законодательства Республики Беларусь;

... причинение вреда окружающей среде – вредное воздействие на окружающую среду, связанное с нарушением требований в области охраны окружающей среды, иным нарушением законодательства Республики Беларусь, в том числе путем выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, сбросов сточных вод в водные объекты с превышением установленных в соответствии с законодательством Республики Беларусь нормативов допустимых выбросов и сбросов химических и иных веществ по одному или более загрязняющему веществу или в отсутствие таких нормативов, если их установление требуется законодательством Республики Беларусь, незаконного изъятия дикорастущих растений и (или) их частей, диких животных, других природных ресурсов;

... компоненты природной среды – земля (включая почвы), недра, воды, атмосферный воздух, растительный и животный мир, а также озоновый слой и околоземное космическое пространство, обеспечивающие в совокупности благоприятные условия для существования жизни на Земле.

¹¹Постановление Совета Министров Республики Беларусь «Об утверждении Положения о порядке исчисления размера возмещения вреда, причиненного окружающей среде, и составления акта об установлении факта причинения вреда окружающей среде» от 17 июля 2008 г. № 1042 [Электронный ресурс] // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=c20801042> (дата обращения: 23.01.2023).

¹²Об охране окружающей среды: Закон Респ. Беларусь, 26 нояб. 1992 г., №1982-ХП (с изм. и доп.) [Электронный ресурс] // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=v19201982> (дата обращения: 23.01.2023).

¹³Там же.

Согласно ст. 1 Кодекса Республики Беларусь о земле от 23.07.2008 № 425-3 (с изменениями и дополнениями)¹⁴:

...Ремля (земли) – земная поверхность, включая почвы, рассматриваемая как компонент природной среды, средство производства в сельском и лесном хозяйстве, пространственная материальная основа хозяйственной и иной деятельности.

Согласно ст. 1 Кодекса Республики Беларусь о недрах от 14.07.2008 № 406-3 (с изменениями и дополнениями)¹⁵:

Недра – часть земной коры, расположенная ниже почвенного слоя, а при его отсутствии – ниже земной поверхности, дна водоемов, водотоков.

Согласно ГОСТу 17.5.1.01-83 «Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения»¹⁶:

Плодородный слой почвы – верхняя гумусированная часть почвенного профиля, обладающая благоприятными для роста растений химическими, физическими и биологическими свойствами.

Согласно ст. 1 Закона Республики Беларусь «О растительном мире» от 14 июня 2003 г.¹⁷:

... Объекты растительного мира – произрастающие растения или их совокупность.

Ситуационный анализ, рассмотрение и сравнение объективных данных, которые обусловили возникновение и наступление исследуемого события, дают основания полагать, что в материалах данного дела недостаточно объективных данных, на основании которых можно вынести категорический вывод о причинении вреда окружающей среде и его масштабах.

С учетом информации, изложенной при ответе на вопросы 1 и 2, можно констатировать, что в результате хозяйственной деятельности на земельном участке вред окружающей среде не причинен, поскольку в результате ведения сельхозпроизводства исходный рельеф местности не изменялся, деградация земель (почв) не выявлена, повреждения плодородного слоя почвы и травянистого растительного покрова не произошли.

Вопрос 4. Допущены ли нарушения правил охраны окружающей среды?

В соответствии с имеющимся решением земельный участок предоставлен в постоянное пользование для ведения сельхозпроизводства. Он имеет ограничения (обременения) прав в использовании земель. Виды ограничений (обременений) прав: земельные участки, расположенные в водоохраных зонах рек и водоемов, код – 2,4; земельные участки, расположенные в прибрежных полосах рек и водоемов, код – 2,5.

В соответствии со ст. 63 Закона Республики Беларусь «Об охране окружающей среды»¹⁸:

... В целях сохранения полезных качеств окружающей среды в Республике Беларусь выделяются следующие природные территории, подлежащие специальной охране:

... водоохраные зоны и прибрежные полосы рек и водоемов.

В соответствии со ст.1, гл.1 Водного кодекса Республики Беларусь¹⁹:

... Водоохранная зона – территория, прилегающая к поверхностным водным объектам, на которой устанавливается режим осуществления хозяйственной и иной деятельности, обеспечивающий предотвращение их загрязнения, засорения...

Прибрежная полоса – часть водоохранной зоны, непосредственно примыкающая к поверхностному водному объекту, на которой устанавливаются более строгие требования к осуществлению хозяйственной и иной деятельности, чем на остальной территории водоохранной зоны.

¹⁴Кодекс Республики Беларусь о Земле: 23 июля 2008 г. № 425-3 (с изм. и доп.) [Электронный ресурс] // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=hk0800425> (дата обращения: 23.01.2023).

¹⁵Кодекс Республики Беларусь о недрах: 14 июля 2008 г. № 406-3 (с изм. и доп.) [Электронный ресурс] // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=hk0800406> (дата обращения: 23.01.2023).

¹⁶ГОСТ 17.5.1.01-83. Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения. Дата введения: 01.07.1984 [Электронный ресурс]. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/43745/> (дата обращения: 23.01.2023).

¹⁷О растительном мире: Закон Респ. Беларусь, 14 июня 2003 г., № 205-3 (с изм. и доп.) [Электронный ресурс] // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=H11800153> (дата обращения: 23.01.2023).

¹⁸Об охране окружающей среды: Закон Респ. Беларусь, 26 нояб. 1992 г., № 1982-XII (с изм. и доп.) [Электронный ресурс] // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=v19201982> (дата обращения: 23.01.2023).

¹⁹Водный кодекс Республики Беларусь: 14 апр. 2014 г., № 143-3: (с изм. и доп.) [Электронный ресурс] // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. URL: <https://etalonline.by/docjouument/?regnum=hk1400149> (дата обращения: 23.01.2023).

В соответствии со ст. 52, гл. 11 Водного кодекса Республики Беларусь²⁰:

... 7. Минимальная ширина водоохранной зоны устанавливается для:

7.1. водоемов, малых рек – 500 метров;

7.2. больших, средних рек – 600 метров.

8. Минимальная ширина прибрежной полосы устанавливается для:

8.1. водоемов, малых рек – 50 метров.

В соответствии с п. 1.7, ст. 53, гл. 11 Водного кодекса Республики Беларусь²¹ в границах водоохраных зон не допускается, если иное не установлено Президентом Республики Беларусь, устройство летних лагерей для сельскохозяйственных животных (мест организованного содержания сельскохозяйственных животных при пастбищной системе содержания).

При проведении экспертного осмотра места экологического правонарушения выявлено, что в границах земельного участка возведено 7 навесов для организованного содержания животных, которые представляют собой сооружения, состоящие из вкопанных деревянных столбов, сверху накрытых шифером. Конструкции скреплены необрезной доской, имеют высоту в нижней части около 2 м, в верхней части около 3 м (рис. 4). Расстояние от навесов для содержания животных до береговой линии реки составляет от 30 до 50 м.

В соответствии с абз. 3 и 6, ч. 1, ст. 70 Кодекса Республики Беларусь о земле, землепользователи обязаны, в том числе осуществлять мероприятия по охране земель, предусмотренные ч. 1 ст. 89 Кодекса Республики Беларусь о земле, не нарушать прав иных землепользователей.

В соответствии с абз. 4, ч. 1, ст. 89 Кодекса Республики Беларусь о земле, землепользователи должны осуществлять в границах предоставленных им (находящимся у них) земельных участков мероприятия по охране земель, в том числе защищать земли от водной и ветровой эрозии, подтопления, заболачивания, засоления, иссушения, уплотнения, загрязнения отходами, химическими и радиоактивными веществами, иных вредных воздействий.

В ходе экспертного осмотра места экологического правонарушения установлено, что на земельном участке имеется несанкционированная свалка отходов производства и потребления, а также перемешанный с мусором и поросший сорной растительностью сбуртованный штабель грунта. Участок распаханного поля на площади до 20 % частично захламлен инородным материалом – пластиковыми бутылками, пленкой, резиновыми отходами, обломками кирпича, корнями древесно-кустарниковой растительности, автомобильными шинами. На площади пойменного луга в отдельных местах складированы остатки необрезных досок и деревянного заборного ограждения.

Вышеуказанные нарушения свидетельствуют об игнорировании землепользователем требований ч. 3, ст. 89 Кодекса Республики Беларусь о земле, которыми установлено, что юридические лица и индивидуальные предприниматели, хозяйственная и иная деятельность которых непосредственно связана с использованием земель или вредным воздействием на них, осуществляют мероприятия по охране земель в соответствии с утвержденными ими планами, согласованными с территориальными органами Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Из этого следует понимать, что природопользователь не в полной мере предпринимает, или вообще не предпринимает определенные действия по охране окружающей среды.

Заключение

В результате проведения судебной экологической экспертизы объектов почвенно-геологического происхождения установлены обстоятельства конкретного экологического правонарушения и даны ответы на вопросы органа, производящего дознание. Показано, что на земельном участке, предоставленном для ведения сельскохозяйственного производства, плодородный слой земли (почвы) не уничтожен, его мощность соответствует среднестатистическим значениям мощности плодородных горизонтов для почв данной типовой принадлежности.

Факт деградации земель (включая почвы), а именно истощения, повреждения, уничтожения или иного ухудшения их состояния по причине хозяйственной деятельности на земельном участке не выявлен. В результате ведения сельскохозяйственного производства на земельном участке вред окружающей среде не причинен, поскольку исходный рельеф местности не изменялся, деградация земель (почв) не выявлена, повреждения плодородного слоя почвы и травянистого растительного покрова не произошли.

²⁰Водный кодекс Республики Беларусь: 14 апр. 2014 г., № 143-З (с изм. и доп.) [Электронный ресурс] // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. URL: <https://etalonline.by/docjouument/?regnum=hk1400149> (дата обращения: 23.01.2023).

²¹Там же.

При ведении хозяйственной деятельности допущено нарушение правил охраны окружающей среды: п. 1.7, ст. 53, гл. 11 Водного кодекса Республики Беларусь – устройство летних лагерей для сельскохозяйственных животных в границах водоохраных зон, прибрежных полос и абз. 4, ч. 1, ст. 89 Кодекса Республики Беларусь о земле – загрязнение отходами производства и потребления.

Библиографические ссылки

1. Баева ЮИ, Черных НА. *Осмотр места экологического правонарушения при проведении судебно-экологической экспертизы*. Москва: РУДН; 2014. 78 с.
2. Черных НА, Усов АИ, Омелянюк ГГ. *Судебно-экологическая экспертиза*. Москва: РУДН; 2008. 260 с.
3. Баева ЮИ, Черных НА. *Судебная экология. Том 1. Исследование экологического состояния объектов почвенно-геологического происхождения*. Москва: РУДН; 2018. 252 с.
4. Муравьев АГ, Каррыев ББ, Ляндсберг АР, редакторы. *Оценка экологического состояния почвы*. Санкт-Петербург: Крисмас+; 2008. 216 с.
5. Омелянюк ГГ, Россинская ЕР. *Судебно-почвоведческая экспертиза*. Москва: ЮНИТИ-ДАНА; 2004. 624 с.

References

1. Baeva YuI, Chernyh NA. *Osmotr mesta ekologicheskogo pravonarusheniya pri provedenii sudebno-ekologicheskoy ekspertizy* [Inspection of the site of an environmental offense during a forensic environmental examination]. Moscow: RUDN; 2014. 78 p. Russian.
2. Chernyh NA, Usov AI, Omel'yanyuk GG. *Sudebno-ekologicheskaya ekspertiza* [Forensic environmental expertise]. Moscow: RUDN; 2008. 260 p. Russian.
3. Baeva YuI, Chernyh NA. *Sudebnaya ekologiya* [Forensic ecology]. Volume 1. *Issledovanie ekologicheskogo sostoyaniya ob'ektov pochvenno-geologicheskogo proiskhozhdeniya* [Research of the ecological state of objects of soil-geological origin]. Moscow: RUDN; 2018. 252 p. Russian.
4. Murav'ev AG, Karryev BB, Lyandsberg AR, editors. *Ocenka ekologicheskogo sostoyaniya pochvy: prakticheskoe rukovodstvo* [Assessment of the ecological state of the soil: a practical guide]. Saint Petersburg: Krimas+; 2008. 216 p. Russian.
5. Omel'yanyuk GG, Rossinskaya ER. *Sudebno-pochvovedcheskaya ekspertiza* [Forensic soil expertise]. Moscow: YuNITI-DANA; 2004. 624 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 25.01.2023.
Received by editorial board 25.01.2023.

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Дубновицкий Ю. С., Горовых О. Г., Жуков Н. В., Саввич К. Ф.</i> Роющая деятельность крота обыкновенного в условиях Беларуси и необходимость его отпугивания.....	4
<i>Новикова Ю. И., Сушко Г. Г.</i> Изменчивость биоразнообразия ассамблей жуужелиц (Coleoptera, Carabidae) верхового болота при антропогенной трансформации их местообитаний.....	12
<i>Яхновец М. Н., Юрченко Е. О.</i> Оценка биологической активности экстрактов из листьев <i>Acer negundo</i> и <i>Robinia pseudoacacia</i> на проростках тест-культур.....	20

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Сеглин В. Н., Шамаль Н. В., Курilenko P. C., Король Р. А., Дворник А. А., Никитин А. Н., Симончик Ю. К., Тимохина Н. И.</i> Распределение радиоактивного и стабильного цезия в почвах и растениях лесных экосистем.....	32
<i>Родькин О. И., Цыбулько Н. Н.</i> Перспективы использования метода фиторемедиации для дезактивации загрязненных радионуклидами территорий.....	42

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Пархимович О. Г., Бичан О. Д., Буланова К. Я.</i> Особенности постлучевых нарушений аккумуляции ионов кальция во внутриклеточных депо тромбоцитов в различные сроки постлучевого периода.....	51
--	----

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Чирикова М. С., Глушень Е. М., Алешкевич И. И., Губчик К. А.</i> Комплексная биологическая очистка сточных вод предприятий мясо-молочной промышленности.....	59
<i>Таврыкина О. М., Дубенок С. А., Громадская Е. П., Ивашко Е. А., Макусь А. З., Шпакова Д. А.</i> Оценка динамики изменения площади связанных с водой экосистем: национальный подход.....	67
<i>Рупасова Ж. А., Добрянская К. А., Сулим Д. О., Задаля В. С., Павловский Н. Б., Павловская А. Г., Шатравко В. Г., Белый П. Н., Гончарова Л. В., Шпитальная Т. В.</i> Накопление фенольных соединений в плодах новых интродуцированных сортов жимолости съедобной (<i>Lonicera edulis Turcz. ex Freyn</i>) в условиях Беларуси.....	81
<i>Позняк С. С.</i> Деградация земель как объект судебной экологической экспертизы.....	90

CONTENTS

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Dubnovitsky Yu. S., Gorovykh O. G., Zhukov N. V., Saevich K. F.</i> Digging activity of the common mole under the conditions of Belarus and the need for its scaring	4
<i>Novikova Yu. I., Sushko G. G.</i> Biodiversity variability of the ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) of a peat bog during anthropogenic transformation of their habitats	12
<i>Yakhnovets M. N., Yurchenko E. O.</i> Evaluation of the biological activity of the extracts from <i>Acer negundo</i> and <i>Robinia pseudoacacia</i> leaves on germinating seeds of test cultures	20

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Seglin V. N., Shamal N. V., Kurilenko R. S., Korol R. A., Dvornik A. A., Nikitin A. N., Simonchik Yu. C., Tsimokhina N. I.</i> Distribution of radioactive and stable cesium in soils and plants of forest ecosystems	32
<i>Rodzik A. I., Tshybulko N. N.</i> Prospects for using the phytoremediation method for deactivation of territories contaminated with radionuclides	42

MEDICAL ECOLOGY

<i>Parkhimovich O. G., Bichan O. D., Bulanova K. Ya.</i> Features of post-radiation disturbances in the accumulation of calcium ions in intracellular platelet depots at different times of the post-radiation period	51
---	----

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Chyrykava M. S., Hlushen A. M., Aliashkevich I. I., Hubchik K. A.</i> Integrated biological wastewater treatment for meat and dairy industry	59
<i>Tavrykina O. M., Dubianok S. A., Gromadskaya E. I., Ivashko E. A., Makus A. Z., Shpakova D. A.</i> Assessment of the dynamics of changes in the area of water-related ecosystems: national approach	67
<i>Rupasova Zh. A., Dobryanskaya K. A., Sulim D. O., Zadalia V. S., Pavlovsky N. B., Pavlovskaya A. G., Shatravko V. G., Bely P. N., Goncharova L. V., Shpitalnaya T. V.</i> Accumulation of phenolic compounds in the fruit of new introduced varieties of (<i>Lonicera edulis</i> Turcz. ex Freyn) in the conditions of Belarus	81
<i>Pazniak S. S.</i> Land degradation as an object of forensic environmental expertise	90

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

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

**Журнал Белорусского
государственного университета. Экология.
№ 1. 2023**

Учредитель:
Белорусский государственный университет

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

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

Тел. 398-89-34, 398-93-44.

www.iseu.bsu.by

E-mail: jecology@bsu.by

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

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

Подписано в печать 27.03.2023.
Тираж 100 экз. Заказ 662.

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

© БГУ, 2023

**Journal
of the Belarusian State University. Ecology.
No. 1. 2023**

Founder:
Belarusian State University

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

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

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

www.iseu.bsu.by

E-mail: jecology@bsu.by

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

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

Signed print 27.03.2023.
Edition 100 copies. Order number 662.

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, 2023