



БЕЛОРУССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ЖУРНАЛ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ЭКОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

ECOLOGY

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

2

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
- Батян А. Н.* Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
- Головатый С. Е.* Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
- Голубев А. П.* Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
- Гричик В. В.* Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
- Дардынская И. В.* Центр всемирного здоровья «Великие озера», Чикаго, США.
- Дзятковская Е. Н.* Институт стратегии развития образования Российской академии образования, Москва, Россия.
- Дроздович В. В.* Национальный институт рака, США, Бетесда.
- Зафранская М. М.* Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
- Кильчевский А. В.* Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
- Коноплев А. В.* Институт радиоактивности окружающей среды университета г. Фукусима, Япония.
- Коровин Ю. А.* Обнинский институт атомной энергетики – Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Обнинск, Россия.
- Ленгфельдер Э.* Радиологический институт здоровья и окружающей среды им. Отто Хуга, Мюнхен, Германия.
- Либератос Г.* Афинский технический университет, Афины, Греция.
- Линге И. И.* Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия.
- Лукашенко С. Н.* Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия.
- Логинов В. Ф.* Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
- Медведев С. В.* ГНУ «Объединенный институт проблем информатики» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
- Набиев И. Р.* Реймский университет, Франция, Реймс.
- Степанов С. А.* Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Россия.
- Стожаров А. Н.* Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь.
- Тарутин И. Г.* ГУ «РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова», Минск, Беларусь.

EDITORIAL BOARD

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

- 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.
- Drozdovitch V. V.* Radiation Epidemiology Branch, DCEG (Division of Cancer Epidemiology and Genetics), National Cancer Institute, Bethesda MD.
- Zafranskaya M. M.* International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
- Kilchevsky A. V.* National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
- Konoplev A. V.* Environmental Radioactivity Institute, Fukushima University, Japan.
- Korovin Y. A.* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia.
- Lengfelder E.* Otto Hug Radiological Institute for Health and Environment, Munich, Germany.
- Lyberatos G.* Athens Technical University, Athens, Greece.
- Linge I. I.* Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
- Lukashenko S. N.* Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia.
- Loginov V. F.* National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
- Medvedev S. V.* The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
- Nabiev I. R.* University of Reims Champagne-Ardenne (URCA), France.
- Stepanov S. A.* International Independent Ecological and Political University, Moscow, Russia.
- Stozharov A. N.* Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus.
- Tarutin I. G.* N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, Minsk, Belarus.

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК [546.56+546.711]:594.3(476.2–25)

НАКОПЛЕНИЕ МЕДИ И МАРГАНЦА В СИСТЕМЕ «ДНО – МОЛЛЮСКИ» В ВОДОЕМАХ Г. ГОМЕЛЯ И НА ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ

Т. В. МАКАРЕНКО¹⁾, А. В. ХАДАНОВИЧ¹⁾, О. В. ПЫРХ¹⁾, Е. А. ПОПИЧЕВА¹⁾

¹⁾Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
ул. Советская, 104, 246028, г. Гомель, Беларусь

Проведена экологическая оценка содержания и накопления меди и марганца донными отложениями водных экосистем г. Гомеля и мягкими тканями моллюсков класса брюхоногих (Gastropoda): прудовика обыкновенного (*Limnaea stagnalis* L.), живородки речной (*Viviparus viviparus* L.). Получен массив данных за период исследований 2019–2021 гг., на основании которого определены фоновые концентрации меди (8,57 мг/кг) и марганца (140,0 мг/кг) в донных отложениях. Фоновое содержание меди в тканях живородки речной и прудовика обыкновенного составило – 8,33 мг/кг и 2,08 мг/кг; марганца – 37,73 мг/кг и 49,34 мг/кг соответственно. В большинстве исследуемых водоемов отмечено снижение средних значений содержания меди в донных отложениях в 2020 и 2021 гг. в 1,4–4,9 раза

Образец цитирования:

Макаренко ТВ, Хаданович АВ, Пырх ОВ, Попичева ЕА. Накопление меди и марганца в системе «дно – моллюски» в водоемах г. Гомеля и на прилегающих территориях. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;2:4–15.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-4-15>

For citation:

Makarenko TV, Khadanovich AV, Pyrkh OV, Popicheva EA. Features of copper and manganese accumulation in the system «bottom – mollusks» of reservoirs of the city of Gomel and adjacent territories. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;2:4–15. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-4-15>

Авторы:

Татьяна Викторовна Макаренко – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры химии.
Альбина Викторовна Хаданович – кандидат химических наук, доцент; доцент кафедры химии.
Ольга Викторовна Пырх – старший преподаватель кафедры химии.
Екатерина Александровна Попичева – магистрант биологического факультета.

Authors:

Tatyana V. Makarenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of chemistry.
tmakarenko1968@bk.ru
Albina V. Khadanovich, PhD (chemistry), docent; associate professor at the department of chemistry.
hadanovich@gsu.by
Olga V. Pyrkh, senior lecturer at the department of chemistry.
korytko@gsu.by
Ekaterin A. Popicheva, master's degree student at the faculty of biology.
ekaterinapopicheva@mail.ru

по сравнению с таковыми в 2019 г., за исключением озер Дедно и Шапор, в которых содержание меди увеличивалось. Диапазон варьирования соединений данного металла за период исследований составил 1,63–47,57 мг/кг. Высокое содержание марганца характерно для донных отложений р. Сож выше черты города по течению (д. Кленки) и оз. Володькино, причем установлено превышение концентрации в 2,0 раза и более величин, характерных для отложений водоемов, принимающих загрязненный поверхностный сток г. Гомеля. Снижение отмечено для донных отложений оз. Шапор и У-образное, а также участков р. Сож выше города по течению и для парковой зоны. Диапазон варьирования содержания соединений марганца в донных отложениях составил 31,28–917,57 мг/кг. Содержание меди в тканях живородки выше в 2021 г. по сравнению с 2019 и 2020 гг. во всех водоемах, за исключением старицы р. Сож, при этом концентрация данного металла изменялась в пределах 4,52–32,93 мг/кг. Установлено снижение содержания марганца в мягких тканях живородки с 2019 по 2021 г. в р. Сож выше города в 4,6 раза, в р. Сож ниже по течению – в 4,8 раза, в оз. Володькино – в 2,7, оз. Любенское – в 2,1 раза, предел варьирования составил от 21,33 до 148,85 мг/кг.

Наличие меди в мягких тканях прудовика составило 0,85–7,19 мг/кг. Изменение содержания марганца в мягких тканях данного вида моллюсков носило немонотонный характер и варьировало в пределах 28,73–118,58 мг/кг.

Изучаемые виды моллюсков следует отнести к группе деконцентраторов, так как рассчитанные значения коэффициентов накопления в большинстве случаев имеют значения, не превышающие единицу.

Ключевые слова: тяжелые металлы; медь; марганец; донные отложения; коэффициент накопления; пресноводные моллюски; водные экосистемы; мониторинг.

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

FEATURES OF COPPER AND MANGANESE ACCUMULATION IN THE SYSTEM «BOTTOM – MOLLUSKS» OF RESERVOIRS OF THE CITY OF GOMEL AND ADJACENT TERRITORIES

T. V. MAKARENKO^a, A. V. KHADANOVICH^a, O. V. PYRKH^a, E. A. POPICHEVA^a

^aFrancisk Skorina Gomel State University
104 Saveckaja Street, Gomel 246028, Belarus

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

Ecological assessment of copper and manganese accumulation by bottom sediments of aquatic ecosystems of Gomel and soft tissues of gastropod class mollusks (Gastropoda): common pond (*Limnaea stagnalis* L.), river (*Viviparus viviparus* L.).

An array of data was obtained for the period 2019–2021, based on which background concentrations of copper (8.57 mg/kg) and manganese (140.0 mg/kg) in bottom sediments were determined. The background content of copper in the tissues of the viviparts of the river and common pond was 8.33 mg/kg and 2.08 mg/kg; manganese -37.73 mg/kg and 49.34 mg/kg, respectively.

In most of the studied reservoirs, the average copper content in bottom sediments in 2020 and 2021 decreased by 1.4–4.9 times compared to those in 2019, with the exception of the Dedno and Shapor lakes, in which the copper content increased. The range of variation of the metal compounds over the study period was 1.63–47.57 mg/kg. The high content of manganese is typical for bottom sediments of the Sozh River upstream of the city (Klenki village) and Volodkino Lake, and the concentration was found to be 2.0 times higher than the values typical for deposits of water bodies receiving contaminated surface runoff from Gomel. The decrease was noted for the bottom sediments of Shapor and U-shaped lakes, as well as sections of the Sozh river upstream and for the park area. The range of variation in the content of manganese compounds in bottom sediments was 31.28–917.57 mg/kg.

The content of copper in viviparous tissues is higher in 2021 compared to 2019 and 2020. in all reservoirs, with the exception of the old river. Sozh, while the concentration of this metal changed in the range of 4.52–32.93 mg/kg. A decrease in the content of manganese in the soft tissues of viviparts was established from 2019 to 2021 in the river. Sozh above the city is 4.6 times, in the river. Sozh downstream – 4.8 times, in оз. Volodkino – 2.7 times, оз. Lyubenskoye – 2.1 times, the range was from 21.33 to 148.85 mg/kg.

The copper content in the soft tissues of the pond was 0.85–7.19 mg/kg. The change in the content of manganese in the soft tissues of this mollusk species was non-monotonic in nature, and ranged from 28.73 to 118.58 mg/kg.

The studied mollusk species should be classified as deconcentrators, since the calculated values of accumulation coefficients in most cases have values not exceeding one.

Keywords: heavy metals; copper; manganese; bottom sediments; accumulation factor; freshwater.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the SPNI «Natural Resources and Environment», subprogram 1 «Natural Resources and their Rational Use», Task «Natural Resources and Environment 1.02», topic

«Comprehensive assessment of the ecological state and identification of spatial and temporal changes in aquatic ecosystems of urbanized territories (on the example of the south-eastern part of Belarus)».

Введение

Мониторинг окружающей среды городов и прилегающих территорий является важнейшей задачей экологических исследований. Аэральные выбросы производства загрязняют почву, наземные и водные экосистемы, фитоценозы и приводят к частичной деградации экосистем городов, что в конечном итоге пагубно сказывается на жизни и здоровье человека [1].

Особое место среди техногенных загрязнителей принадлежит тяжелым металлам, в частности меди и марганцу. Данные металлы характеризуются устойчивостью соединений, и при переходе по трофическим цепям отмечается увеличение их концентраций в конечных звеньях цепи [2]. Тяжелые металлы в значительных концентрациях характеризуются токсичностью, что проявляется в нарушении функций энзимов, ферментативных систем, в образовании стабильных комплексов с важнейшими метаболитами, в нарушении проницаемости мембран клеток и др. Но в малых количествах соединения металлов участвуют в биохимических процессах, протекающих в организмах. Например, медь активно используется моллюсками в процессе жизнедеятельности, встречается в большом количестве ферментов: в цитохром с-оксидазе, активирующей гемоцианин, в ферменте супероксиддисмутазе и в переносящем молекулярный кислород белке гемоцианине. В составе гемоцианина в виде имидазольного комплекса ион меди играет роль, аналогичную роли порфиринового комплекса железа в молекуле белка гемоглобина в крови позвоночных животных. Немаловажное значение в жизнедеятельности живых организмов имеет марганец. Данный элемент входит в состав многих органических и неорганических соединений, регулирующих функционирование нервной и кровеносной системы, принимает участие в формировании костной ткани, синтезе белков, молекул АТФ, а также в регуляции клеточного метаболизма организма человека [3].

Металлы в природной среде, особенно в донных отложениях, находятся в непрерывном процессе миграции, которая может осуществляться как в механической (сорбированные на поверхности твердых частиц), так и в растворенной и коллоидальной формах, при этом происходит непрерывный обмен между гидро- и литосферой через одну из известных геохимических барьерных зон «дно – вода». Биологически доступные формы тяжелых металлов являются наиболее опасными вследствие длительного воздействия на живые организмы в малых дозах, которое способствует постепенному накоплению их в органах и тканях, к деградации целых экосистем. Тяжелые металлы, являясь составной частью донных отложений, попадают в организмы бентоса, далее – рыб и по трофическим цепям – в пищу человека, где могут накапливаться в жизненно важных органах и тканях [4]. Донные отложения являются своеобразными хранилищами тяжелых металлов, служат отражением изменения геохимических условий на территории водосбора, следовательно, особая роль должна отводиться оценке уровня их загрязнения. Под влиянием изменения физико-химических условий состояния водоемов и окружающей среды (гидрологических условий, pH, значений окислительно-восстановительных потенциалов, содержания кислорода и др.) адсорбированные донными отложениями соединения металлов могут переходить в толщу воды и оказывать негативное влияние на окружающую среду, угрожая возникновению вторичного загрязнения водоемов тяжелыми металлами [5].

Пресноводные моллюски – широко используемый объект исследований акваторий, испытывающих техногенное влияние. Благодаря способности накапливать практически все тяжелые металлы, присутствующие в среде обитания, и значительной биомассе, моллюскам принадлежит важная роль в процессах аккумуляции и биоседimentации различных веществ в пресноводных экосистемах. Кроме того, в организм гидробионта поступление металлов происходит двумя путями: из воды через покровные ткани (сорбция на поверхности раковины) и через желудочно-кишечный тракт в результате усвоения пищи. Это дает возможность рассматривать данные виды беспозвоночных, с одной стороны, как виды-индикаторы загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами, а с другой – как организмы, активно участвующие в процессах перераспределения тяжелых металлов в гидробиоценозах [6]. Моллюски, обитающие в водных экосистемах, могут выступать в качестве биоаккумуляторов тяжелых металлов и передавать их по трофическим цепям. Данные гидробионты недостаточно исследованы в плане изменения доступных форм токсичных элементов в абиотических компонентах водоемов в силу того, что поступление загрязняющих веществ значительно варьирует в зависимости от условий существования водных экосистем. Количественная оценка содержания тяжелых металлов важна как для практических целей, так и для решения фундаментальных проблем.

Абсолютные значения концентраций тяжелых металлов в тканях и органах водных животных и растений не всегда показывают истинную картину загрязнения водных экосистем, так как организм может осуществлять контроль за поступлением токсикантов в отдельные органы и ткани. При поступлении

избыточных количеств элементов в окружающую среду живые организмы задействуют определенные механизмы детоксикации, ограничивающие или даже устраняющие возникающий при этом токсический эффект. В чистом водоеме живые организмы накапливают все доступные формы металла, в загрязненном водоеме существует предел накопления, после которого поступление токсиканта в организм практически прекращается, однако при достижении определенной концентрации в воде и донных отложениях соединения металла начинают поступать в организм пропорционально содержанию их в абиотических компонентах. В результате происходит так называемый срыв работы механизма блокировки поступления металла в организм.

Поступление любых токсикантов в организм блокируется посредством механизмов, предотвращающих или ограничивающих проникновение тяжелых металлов в клетку, в результате исключается токсическое действие на внутриклеточные процессы и обеспечивается их устойчивость к действию загрязнителей. В значительной степени этот вопрос изучен на примере растений [8; 7]. В случае активной работы данных механизмов живой организм может нормально существовать, даже несмотря на высокий уровень загрязнения окружающей среды [6].

Цель исследования – изучить содержание и накопление меди и марганца в донных отложениях и тканях брюхоногих моллюсков водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий с различным характером антропогенной нагрузки.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в течение 2019–2021 гг. в некоторых водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий с различным характером антропогенной нагрузки. Для оценки влияния Гомельской городской агломерации на качество воды р. Сож и способности реки к самоочищению выполнялся отбор проб из реки выше города в районе д. Кленки, в городской черте в районе парковой набережной и ниже административной черты города по течению в районе Гомельского объездного моста. Старица у д. Поляновка расположена на 10 км выше по течению от точки отбора проб на р. Сож у д. Кленки (рис. 1).

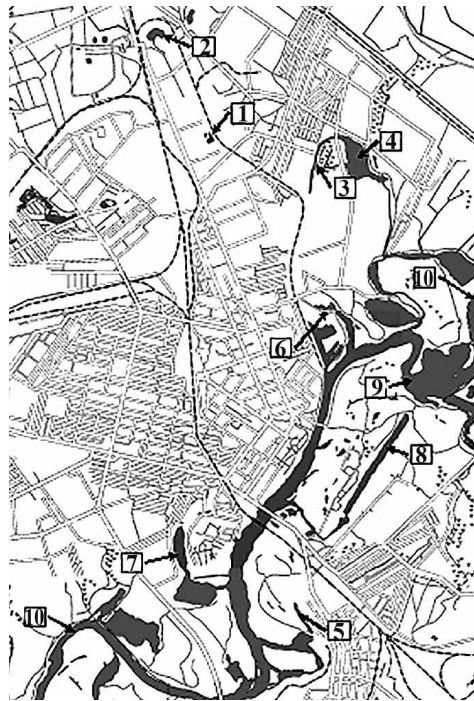


Рис. 1. Схема расположения водоемов г. Гомеля: 1) оз. Малое; 2) оз. Круглое; 3) оз. У-образное; 4) оз. Волотовское; 5) оз. Шапор; 6) оз. Дедно; 7) оз. Любенское; 8) Гребной канал; 9) оз. Володькино; 10) р. Сож

Fig. 1. Arrangement of water bodies in Gomel: 1) lake Maloe; 2) lake Krugloe; 3) lake U-obraznoe; 4) lake Volotovskoe; 5) lake Shapor; 6) lake Dedno; 7) lake Liubenskoe; 8) Grebnoy val; 9) lake Volodkiino; 10) river Sozh

В качестве объекта исследований выбраны донные отложения и два вида брюхоногих моллюсков (Gastropoda), массово встречающихся в водоемах Беларуси: прудовик обыкновенный (*Limnaea stagnalis* L.) и живородка речная (*Viviparus viviparus* L.). У представителей данных видов различаются пути поступления в организм как питательных веществ, так и токсикантов. В изучаемых водоемах живородка встречается на камнях и корягах как обрастатель, а также большое количество особей находится в иловой

фракции донных отложений. Представители данного вида моллюсков в качестве объекта питания используют и высшие водные растения, соскребая слизь, и бактерии, находящиеся на них. Прудовик в изучаемых водоемах встречается только на растениях, которые использует в пищу. Связь прудовика с донными отложениями является опосредованной через растительные организмы, которые активно поглощают металлы из донных отложений и воды.

Для отлова моллюсков использовали дночерпатель и применяли ручной сбор. Мягкие ткани отделяли от раковин, сушили, а затем озоляли до белой золы в муфельной печи при 450 °С. Донные отложения отбирались по стандартной методике [8; 9]. Отобранные образцы высушивались до воздушно-сухого состояния. Ситовым методом выделялась фракция менее 1 мм, затем пробы озолялись при 450 °С. Содержание тяжелых металлов в золе тканей моллюсков и донных отложений определяли методом ISP масс-спектрометрии, на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой *Elan DRCe (Perkin Elmer)*, на базе лаборатории радиоэкологии «Института радиобиологии НАН Беларуси».

Полученные данные обработаны статистически в программе *Microsoft Excel*, проведен парный двухвыборочный t-тест для средних и корреляционный анализ.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследований, проводимых с 2010 по 2019 г., свидетельствуют, что содержание отдельных тяжелых металлов в моллюсках и донных отложениях старицы р. Сож (д. Поляновка) – водоема, не имеющего видимой антропогенной нагрузки, расположенного на 10 км выше города по течению р. Сож и использованного ранее в качестве фонового водоема, в различные временные промежутки было сравнимо с концентрациями исследуемых соединений в осеях и донных отложениях городских водоемов, а в некоторых случаях даже превышало таковое [9]. Объяснение данным фактам может быть следующим – в относительно «чистых» зонах живые организмы накапливают практически все доступные формы тяжелых металлов, тогда как на загрязненных территориях включается механизм блокировки, который предотвращает поступление значительной концентрации в живые организмы. Высока вероятность, что при изменившихся физико-химических условиях в донных отложениях водоема и воде старичного комплекса изменилась доступность тяжелых металлов для живых организмов водоема. Все это вызвало необходимость расчета фоновых концентраций для мягких тканей моллюсков и донных отложений при проведении мониторинговых исследований загрязнения водных экосистем изучаемой территории. Необходимо указать, что в период с 2010 по 2022 г. содержание изучаемых металлов в мягких тканях моллюсков и донных отложениях снизилось в 1,5 раза и более. И, следовательно, полученные ранее данные невозможно использовать для оценки степени загрязнения водных экосистем [9].

Для установления фоновых концентраций в донных отложениях изучаемых водоемов и в мягких тканях моллюсков был использован статистический метод¹. Согласно данному методу, отдельно в каждом выделенном периоде (сезоне) исключаются непоказательные экстремальные значения концентрации, затем рассчитывают средние значения концентрации тяжелых металлов в исследуемых образцах. Период с наибольшей средней концентрацией вещества принимают в рассматриваемой версии за основную фоновую величину. Сравнительный анализ полученных результатов исследований объектов мониторинга за 2021–2021 гг. позволил выявить различия в содержании изучаемых металлов в донных отложениях. Фоновые величины содержания меди и марганца в донных отложениях водоемов составили 8,57 мг/кг и 140,0 мг/кг соответственно. За период исследований 2010–2021 гг. фоновое содержание меди в тканях живородки речной и прудовика обыкновенного – 8,33 мг/кг и 2,08 мг/кг; марганца – 37,73 мг/кг и 49,34 мг/кг соответственно.

На рис. 2 представлены результаты исследований по изучению содержания меди в донных отложениях в 2019–2021 гг. В большинстве исследуемых водоемов отмечалось снижение средних значений содержания меди в донных отложениях в 2020 г. и 2021 г. в 1,4–4,9 раза по сравнению с таковыми в 2019 г., за исключением озер Дедно и Шапор, в донных отложениях которых содержание меди увеличивалось. Данный факт подтверждает поступление соединений меди в оз. Дедно из водоема-отстойника, следовательно, со сточными водами предприятий г. Гомеля. Оз. Дедно напрямую контактирует через небольшую земляную дамбу с водоемом, принимающим стоки Прудковского и Хатаевичского коллекторов, а также стоки автопредприятий и фабрики «Спартак». Не исключено поступление загрязненного поверхностного стока в оз. Дедно. Оз. Шапор принимает поверхностный сток с территории микрорайона «Новобелица», включающий две улицы частного сектора, а также с территории таких предприятий, как ОАО «Гомельдрев», филиала «Гомельобой» ОАО «ЦБК-Консалт» и Фанеро-спичечный комбинат, ЧПУП (г. Гомель). Содержание

¹ТКП 17.06-04-2012 (02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Правила установления фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов: введен 17.06.12. Минск: Госстандарт, 2012. 23 с.

меди в донных отложениях оз. Шапор варьировало от 7,95 мг/кг (2019 г.) до 9,56 мг/кг (2021 г.), оз. Дедно – от 18,67 (2019 г.) до 41,00 мг/кг, что может свидетельствовать о содержании соединений меди в поверхностном стоке, идущем в водоемы с водосборных территорий.

Участок р. Сож парковой зоны принимает стоки ливневой канализации, собирающей воду практически со всей центральной части города, а также поверхностный сток с территории судоремонтного завода, Гомельского речного порта и элеватора. Однако содержание меди в донных отложениях изменялось незначительно (4,65–6,13 мг/кг) по сравнению с показателями других водоемов на протяжении всего периода исследований, что также может свидетельствовать о наличии соединений данного металла, хоть и в незначительном количестве, в воде ливневой канализации г. Гомеля.

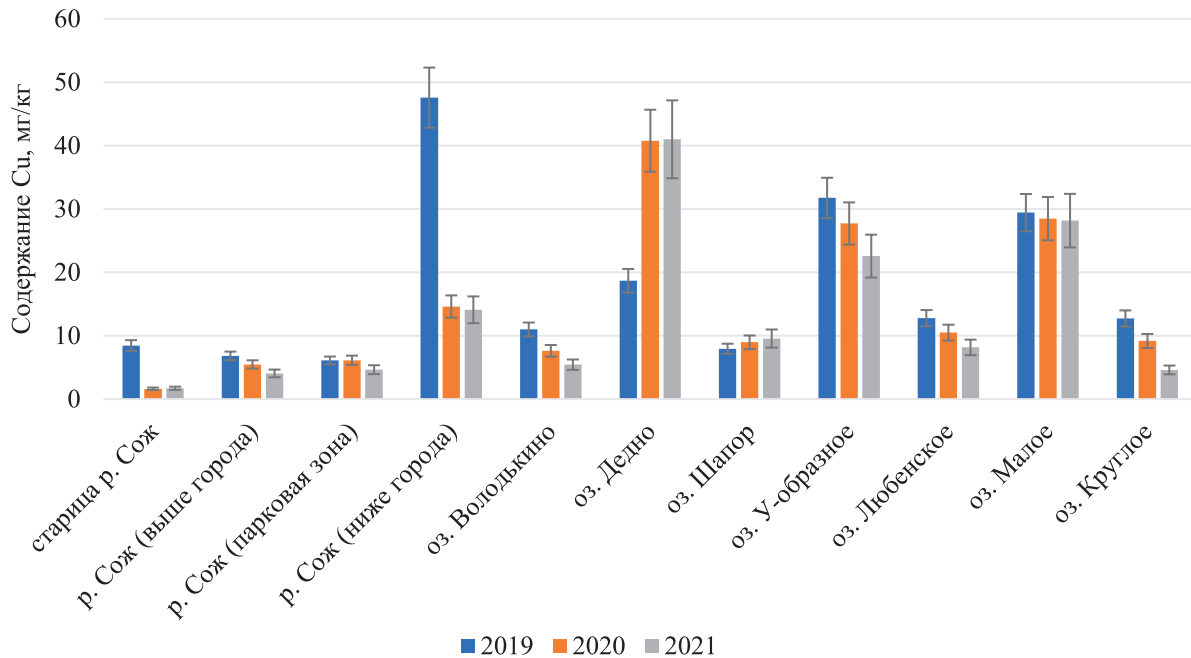


Рис. 2. Содержание меди в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий в 2019–2021 гг., (мг/кг)

Fig. 2. Copper content in bottom sediments of reservoirs in Gomel and adjacent territories in 2019–2021, (mg/kg)

На рис. 3 представлен характер варьирования содержания марганца в донных отложениях.

Высокое содержание металла характерно для донных отложений р. Сож выше черты города по течению (д. Кленки) и оз. Володькино, причем установлено превышение концентрации в 2,0 раза и более величин, характерных для отложений водоемов, принимающих загрязненный поверхностный сток г. Гомеля. В 2019 г. максимальные величины содержания марганца отмечено в отложениях оз. Дедно и в период с 2020–2021 гг. – на участке р. Сож ниже административной черты города. Однонаправленное снижение соединений марганца отмечено для донных отложений оз. Шапор и У-образное, а также участков р. Сож выше города по течению и для парковой зоны. Сложно объяснить снижение концентрации металла в 8,0 раз в оз. Шапор в период с 2020 по 2021 г. Содержание марганца в донных отложениях р. Сож ниже административной черты города в 4,5–6,5 раза выше, чем на участке р. Сож парковой зоны.

На участке р. Сож в парковой зоне содержание марганца в донных отложениях за период исследования с 2019 по 2021 г. снизилось. Неоднозначная динамика содержания изучаемого металла возможно вызвана изменениями физико-химических и микробиологических процессов, поскольку аккумулятивный поллютант может поступать из донных отложений в воду. Миграция тяжелых металлов из донных грунтов в воду создает при определенных условиях опасность вторичного загрязнения, поэтому уровни содержания тяжелых металлов в донных отложениях являются интегральными показателями загрязнения водоемов.

В период исследований 2019–2021 гг. в тканях живородки в большинстве водных экосистем (в 6-ти из 11-ти водоемов) содержание меди однонаправленно увеличивается, в тканях прудовика увеличение концентраций характерно для двух водоемов (рис. 4, 5). Это может свидетельствовать об увеличении доступности металлов в отложениях водных экосистем изучаемой территории.

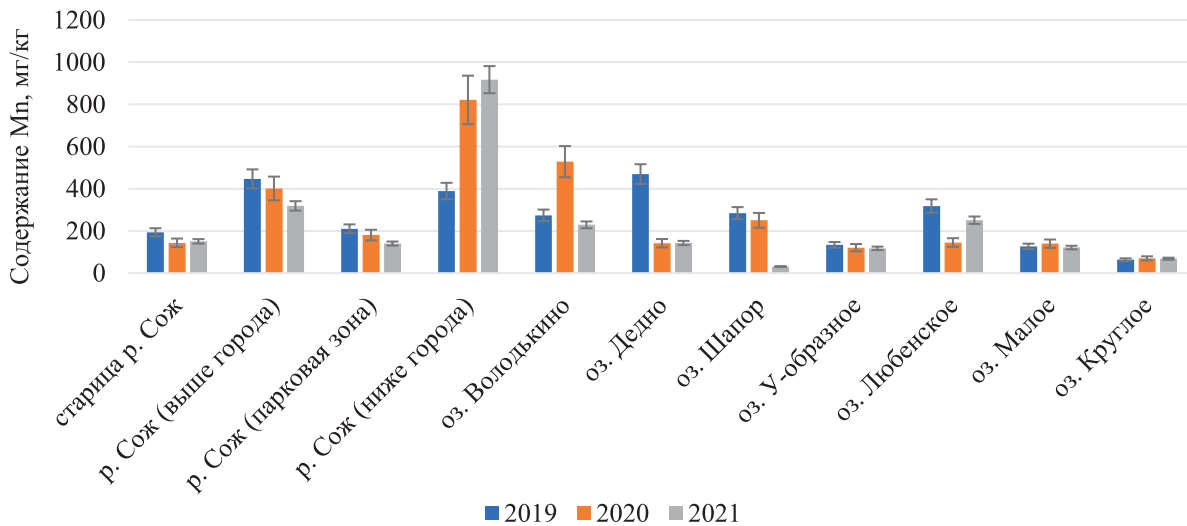


Рис. 3. Содержание марганца в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий в 2019–2021 гг., (мг/кг)

Fig. 3. Manganese content in bottom sediments of reservoirs in Gomel and adjacent territories in 2019–2021, (mg/kg)

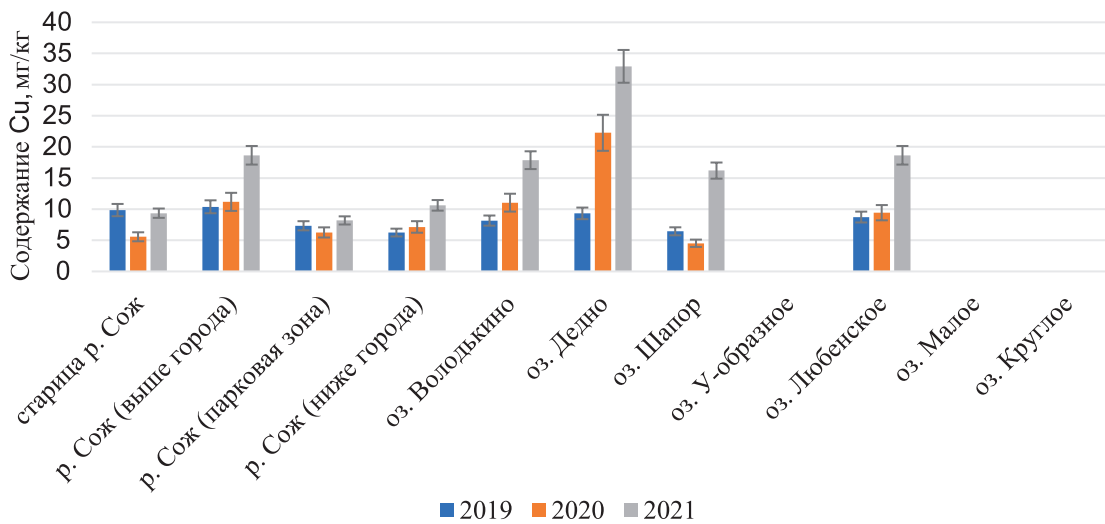


Рис. 4. Содержание меди в тканях живородки в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий в 2019–2021 гг., (мг/кг)

Fig. 4. The content of copper in viviparous tissues in the reservoirs of Gomel and adjacent territories in 2019–2021, (mg/kg)

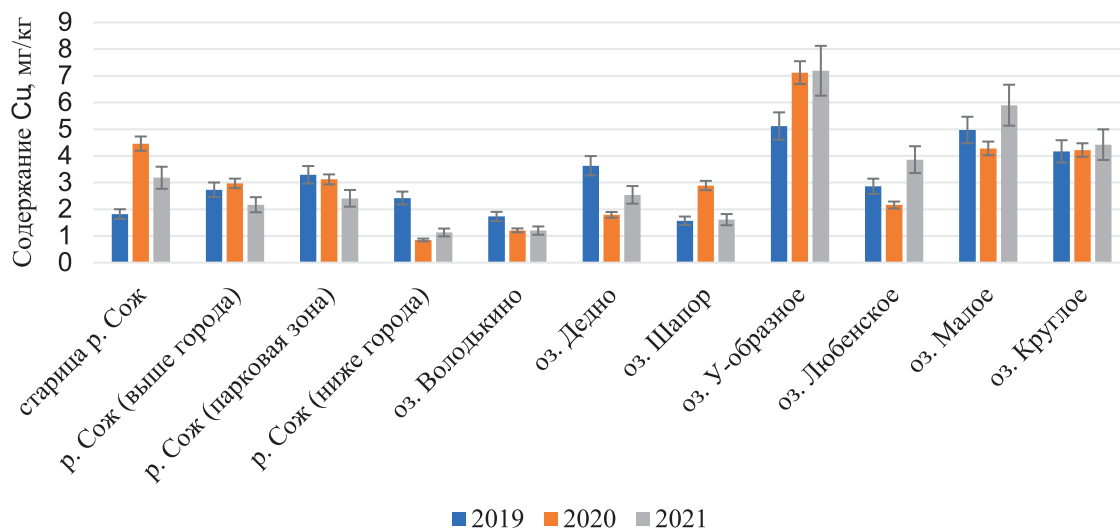


Рис. 5. Содержание меди в тканях прудовика в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий в 2019–2021 гг., (мг/кг)

Fig. 5. Copper content in the ponds in the reservoirs of Gomel and adjacent territories in 2019–2021, (mg/kg)

Отмечена тенденция к увеличению содержания меди в тканях живородки в 2021 г. по сравнению с 2019 и 2020 гг. во всех водоемах, за исключением старицы р. Сож. Максимумы увеличения содержания исследуемого металла в 2021 г. установлены в тканях моллюсков, обитающих в оз. Дедно – в 3,5 раза по сравнению с показателями 2019 г., в оз. Шапор – в 2,5 раза и 3,6 раза по сравнению с величинами, зафиксированными в 2019 г. и 2020 г. соответственно.

Выявлено увеличение концентрации меди в тканях живородки по сравнению с фоновым содержанием за период исследований. Так, в 2019 г. все представители данного вида характеризовались величинами содержания меди, не превышающими фоновое значение (8,33 мг/кг), кроме представителей, обитающих в р. Сож в районе д. Кленки (превышение фона составило 19,7 %). В 2020 г. превышение фоновых значений содержания металла отмечено в тканях живородки, обитающей в р. Сож в районе д. Кленки (на 25,4 %), в оз. Володькино (на 24,5 %) и в оз. Дедно (на 62,6 %). В 2021 г. во всех образцах тканей моллюсков, отобранных в изучаемых водоемах, выявлены более высокие значения содержания меди по сравнению с фоновыми величинами – максимум отличий в 74,4 % зафиксирован для особей, обитающих в оз. Дедно.

Значения содержания меди в мягких тканях прудовика за весь период исследований не превышали фоновые. Диапазон концентраций меди в мягких тканях данного вида моллюсков составлял 0,85 мг/кг (р. Сож ниже города, 2020 г.) – 7,19 мг/кг (оз. У-образное, 2021 г.). Проведенный статистический анализ позволил рассчитать корреляционные зависимости содержания меди в мягких тканях изученных видов моллюсков от ее концентрации в донных отложениях. Прямая корреляционная связь отмечена для живородки речной. Коэффициенты корреляции составили 0,53 (2019 г.), 0,86 (2020 г.), 0,81 (2021 г.) при $p < 0,05$. Значимых корреляционных зависимостей между содержанием меди в тканях прудовика и донных отложениях не выявлено.

На рис. 6 и 7 приведены данные о содержании марганца в мягких тканях изучаемых видов моллюсков. Марганец представлен в иловых растворах преимущественно (75–95 %) не связанными в комплексные соединения ионами, что значительно увеличивает скорость его молекулярной диффузии. Следовательно, характер накопления в тканях моллюсков отличен от характера накопления меди. Отмечено снижение содержания марганца в мягких тканях живородки с 2019 по 2021 г. в р. Сож выше города в 4,6 раза, в р. Сож ниже по течению – в 4,8 раза, в оз. Володькино – в 2,7 раза, оз. Любенское – в 2,1 раза. В 2019 г. превышение фоновых значений количественного содержания марганца в тканях живородки зафиксировано во всех водоемах в 1,2–3,9 раза, в 2020 г. – фоновые значения не превышены в мягких тканях образцов моллюсков только двух водоемов (озерах Дедно и Шапор), в 2021 г. превышение фона содержания марганца в тканях живородки не зафиксировано ни в одном из изучаемых водоемов.

Единой динамики в изменении содержания марганца в тканях прудовика не наблюдалось. Варьирование концентраций металла составило от 28,73 мг/кг в оз. Шапор (2019 г.) до 125,25 мг/кг оз. Круглое (2021 г.), отмечалось превышение фона содержания металла в мягких тканях большинства особей данного вида моллюсков за исследуемый период. Корреляционных связей между содержанием металла в тканях как живородки, так и прудовика и содержанием его в донных отложениях не выявлено.

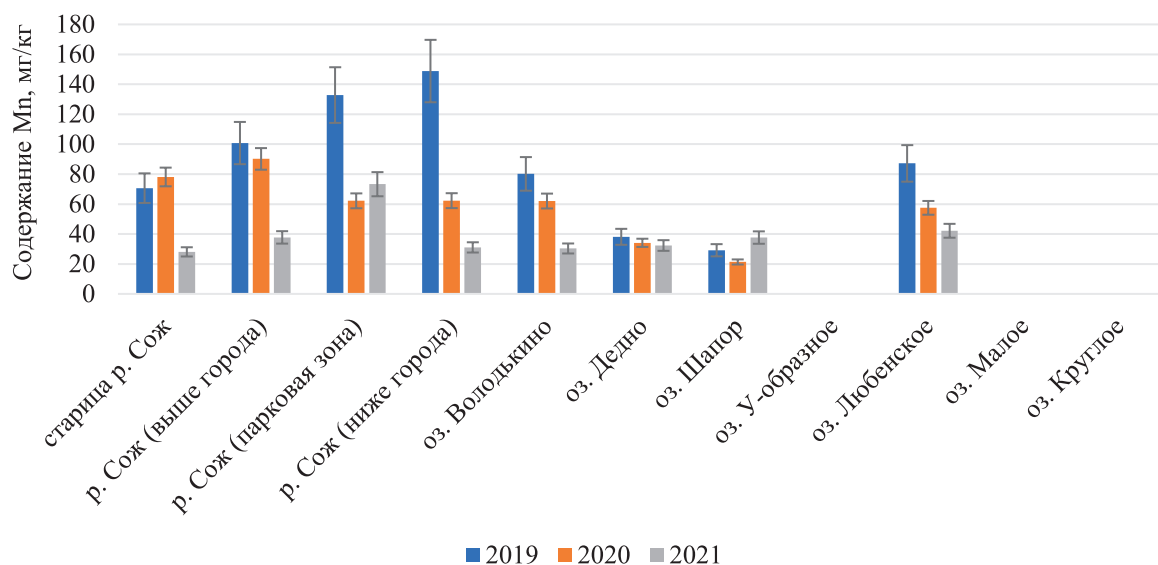


Рис. 6. Содержание марганца в тканях живородки в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий в 2019–2021 гг., (мг/кг)

Fig. 6. Manganese content in viviparous tissues in the reservoirs of Gomel and adjacent territories in 2019–2021, (mg/kg)

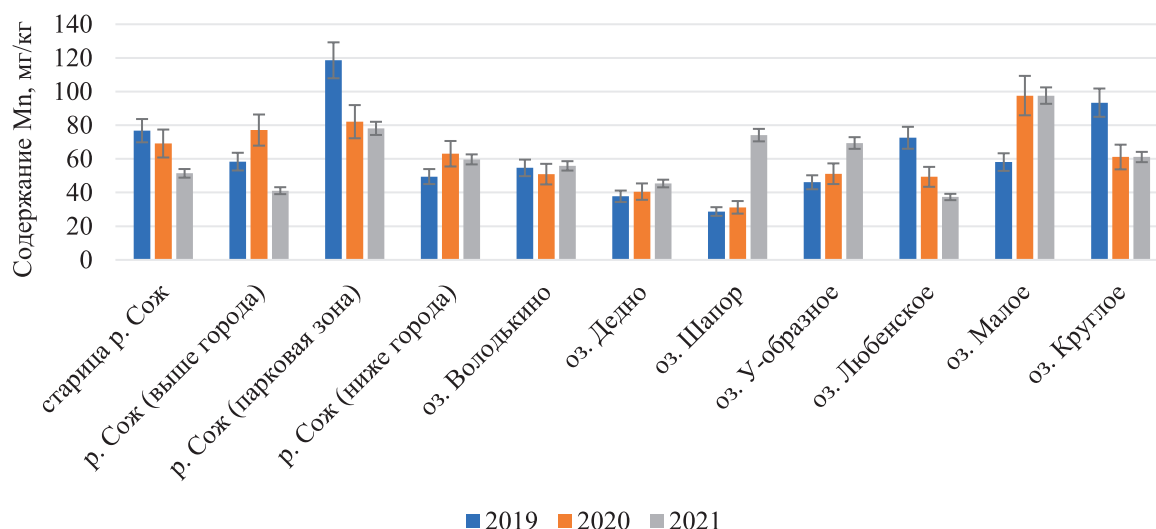


Рис. 7. Содержание марганца в тканях прудовика в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий в 2019–2021 гг., мг/кг

Fig. 7. Manganese content in ponds in reservoirs of Gomel and adjacent territories in 2019–2021, mg/kg

Для объективной оценки биологической доступности соединений изучаемых металлов в водных объектах используется коэффициент накопления, который рассчитывается по следующей формуле:

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

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

Коэффициент накопления свидетельствует о наличии факта «контроля» со стороны гидробионтов за поступлением загрязнителей в метаболически важные центры и позволяет косвенно судить о степени доступности элемента в среде обитания для живых организмов и о поведении поллютантов в системах «донные отложения – моллюски».

В табл. 1 приведены значения рассчитанных значений коэффициентов накопления меди и марганца в тканях моллюсков. Не выявлены зависимости коэффициентов накопления тяжелых металлов в моллюсках от содержания их в донных отложениях неоднозначна. Различия объясняются существованием видоспецифичности концентрирования и особенностями вида обитания. Используя значения коэффициентов накопления организмы можно разделить на три группы: макроконцентраторы – $K_n > 2$; микроконцентраторы $1 < K_n < 2$ и деконцентраторы $K_n < 1$ [10]. По сравнению с данными, полученными в 2019 г., значения коэффициентов накопления меди в 2021 г. в живородке были выше во всех водных экосистемах в 1,47–8,83 раза, в прудовике – в 1,23–8,46 раза (исключение участок р. Сож парковой зоны и оз. Дедно), что может свидетельствовать об увеличении доступности металлов в отложениях водных экосистем. Коэффициент накопления, рассчитанный для живородки выше в 2,0–5,7 раза, чем для прудовика, что указывает на разную доступность соединений меди в компонентах водоема для особей изучаемых видов и неодинаковую физиологическую необходимость меди в организме прудовика и живородки.

У живородки в 2021 г. значения коэффициента накопления марганца в 1,2–2,23 раза ниже, чем в 2019 г. (исключение озера Дедно и Шапор), что указывает на увеличение контроля со стороны особей данного вида за поступлением соединений марганца в органы и ткани.

Выделенные значения показывают минимальные и максимальные значения коэффициентов накопления металлов. Максимальное снижение величины коэффициента накопления данного металла у особей данного вида на участке р. Сож ниже черты города – 12,6 раза, где концентрация марганца в донных отложениях увеличивается к 2021 г. У прудовика накопление металла в тканях возрастает к 2021 г. в большей части изучаемых водных экосистем, что может быть связано с большей доступностью соединений марганца в донных отложениях водоемов в сравнении с живородкой. Единая динамика накопления марганца в тканях живородки и прудовика отмечена в старичном комплексе, в парковой зоне р. Сож и в оз. Любенское, хотя динамика изменения содержания металла в донных отложениях сходна только для старицы и оз. Любенское. Интересен тот факт, что характер динамики накопления марганца в тканях моллюсков обратен динамике содержания металла в донных отложениях. Это указывает на необходимость контроля за поступлением и металлов в ткани живых организмов в зависимости от содержания в донных отложениях.

Таблица 1

Коэффициенты накопления меди и марганца в тканях моллюсков,
обитающих в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий

Table 1

Factors of copper and manganese accumulation in tissues
of mollusks living in water bodies of the city of Gomel and adjacent territories

Место отбора	2019	2020	2021
Живородка			
старица р. Сож	<u>1,16</u> 0,36	<u>3,41</u> 0,54	<u>5,47</u> 0,19
р. Сож (выше города)	<u>1,52</u> 0,23	<u>2,04</u> 0,22	<u>4,59</u> 0,12
р. Сож (парковая зона)	<u>1,20</u> 0,63	<u>1,02</u> 0,34	<u>1,76</u> 0,52
р. Сож (ниже города)	<u>0,13</u> 0,38	<u>0,49</u> 0,08	<u>0,75</u> 0,03
оз. Володькино	<u>0,74</u> 0,29	<u>1,45</u> 0,12	<u>3,28</u> 0,13
оз. Дедно	<u>0,50</u> 0,08	<u>0,55</u> 0,24	<u>0,80</u> 0,23
оз. Шапор	<u>0,20</u> 0,10	<u>0,50</u> 0,09	<u>1,69</u> 1,20
оз. У-образное	–	–	<u>1,71</u> 0,04
оз. Любенское	<u>0,68</u> 0,27	<u>0,90</u> 0,40	<u>2,28</u> 0,17
Прудовик			
старица р. Сож	<u>0,22</u> 0,40	<u>2,74</u> 0,48	<u>1,86</u> 0,34
р. Сож (выше города)	<u>0,40</u> 0,13	<u>0,54</u> 0,19	<u>0,53</u> 0,13
р. Сож (парковая зона)	<u>0,54</u> 0,56	<u>0,51</u> 0,45	<u>0,52</u> 0,56
р. Сож (ниже города)	<u>0,05</u> 0,13	<u>0,06</u> 0,08	<u>0,08</u> 0,07
оз. Володькино	<u>0,16</u> 0,20	<u>0,16</u> 0,10	<u>0,22</u> 0,24
оз. Дедно	<u>0,19</u> 0,08	<u>0,04</u> 0,29	<u>0,06</u> 0,32
оз. Шапор	<u>0,04</u> 0,10	<u>0,32</u> 0,12	<u>0,17</u> 2,37
оз. У-образное	<u>0,17</u> 0,46	<u>0,26</u> 0,42	<u>0,32</u> 0,59
оз. Любенское	<u>0,22</u> 0,23	<u>0,21</u> 0,34	<u>0,47</u> 0,15
оз. Малое	<u>0,17</u> 0,46	<u>0,15</u> 0,44	<u>0,21</u> 0,65
оз. Круглое	<u>0,33</u> 1,46	<u>0,46</u> 1,39	<u>0,96</u> 1,83

Примечание. Значения Кн в мягких тканях моллюсков: числитель – медь; знаменатель – марганец.

В тканях живородки накопление марганца к 2021 г. в изучаемых водоемах снижается, за исключением участка р. Сож парковой зоны и оз. Шапор, что является свидетельством изменения форм нахождения металла в отложениях водоема для особей данного вида. Необходимо учитывать факт блокировки поступления металлов в ткани моллюсков. Для прудовика в 6-ти из 11-ти водоемов значение коэффициентов накопления в 2021 г. выше либо равно величинам, рассчитанным в 2019 и 2020 гг.

Средние значения коэффициентов накопления меди мягкими тканями живородки и прудовика составили в 2019 г. – 0,67 и 0,23; в 2020 – 1,00 и 0,50; в 2021 г. – 2,60 и 0,49 соответственно. Характер изменения коэффициентов накопления марганца мягкими тканями живородки и прудовика выражался следующими значениями рассчитанной величины: 2019 г. 0,30 и 0,38; в 2020 – 0,25 и 0,39; в 2021 г. – 0,29 и 0,66 соответственно. Специфика такого распределения, вероятно, связана с особенностями источников поступления тяжелых металлов в водоемы и с видовыми различиями моллюсков.

Заключение

С применением статистического метода рассчитаны фоновые величины содержания меди и марганца в донных отложениях водоемов, которые составили 8,57 мг/кг и 140,0 мг/кг соответственно. В период исследований 2010–2021 гг. фоновое содержание меди в тканях живородки речной и прудовика обыкновенного составило – 8,33 мг/кг и 2,08 мг/кг; марганца – 37,73 мг/кг и 49,34 мг/кг соответственно.

Проведенный мониторинговый анализ содержания и накопления меди и марганца в биотических и абиотических компонентах водных экосистем за период исследования позволил выявить различные тенденции в изменении содержания изучаемых металлов в донных отложениях и мягких тканях моллюсков с течением времени.

Выявлена прямая корреляционная связь для живородки речной между содержанием меди в мягких тканях от ее содержания в донных отложениях. Коэффициенты корреляции составили 0,53 (2019 г.), 0,86 (2020 г.), 0,81 (2021 г.) при $p < 0,05$. Значимых корреляционных зависимостей между концентрацией меди в тканях прудовика и донных отложениях не выявлено. Корреляционных связей между содержанием металла в тканях как живородки, так и прудовика и содержанием марганца в донных отложениях не установлено.

Отмечены различия в вариабельности коэффициентов биологического накопления металлов в моллюсках различных видов в одном и том же водоеме. Изучаемые виды следует отнести к группе деконцентраторов, так как рассчитанные значения коэффициентов накопления рассматриваемых металлов (в большинстве случаев) имеют значения, не превышающие единицу. Обратная динамика между величиной коэффициента накопления марганца и содержанием металла в донных отложениях характерна для большинства водоемов, что указывает на увеличение доступности соединений металла в донных отложениях и протекание вторичных процессов загрязнения изучаемых водных экосистем. Полученные результаты подтверждают необходимость анализа не только абсолютных величин содержания металлов в тканях моллюсков и донных отложений, но и значений коэффициентов накопления марганца в живых организмах, что более четко указывает на доступность соединений тяжелых металлов в донных отложениях водных экосистем и наличие механизмов, контролирующего поступление загрязнителей в ткани гидробионтов.

Проведенный корреляционный анализ между содержанием меди и марганца в донных отложениях исследуемых водоемов, а также между концентрацией данных металлов в тканях моллюсков указывает на отсутствие корреляционных связей между концентрациями исследуемых металлов как в донных отложениях, так и в мягких тканях моллюсков, что служит иллюстрацией различного характера поступления и связывания металлов с составляющими донных отложений, а также свидетельствует о различных механизмах сорбции их мягкими тканями изучаемых видов моллюсков.

Для мониторинга содержания доступных форм меди в донных отложениях водоемов изучаемой территории из изученных видов моллюсков целесообразно использовать живородку речную, а для наличия соединений марганца – прудовика обыкновенного.

Библиографические ссылки

1. Макаренко ТВ, Грищенко ИВ, Макаренко АИ, Никитин АН. Изучение содержания некоторых тяжелых металлов в мягких тканях живородки обыкновенной (*Viviparus viviparus* L.), обитающей в р. Сож в районе г. Гомеля. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;1:29–39.
2. Мисейко ГН. *Биологический анализ качества пресных вод*. Барнаул: Алтайский государственный университет, 2001. 201 с.
3. Кадацкая ОВ, Санец ЕВ, Овчарова ЕП. *Гидрографическая сеть урбанизированных территорий как элемент формирования природного каркаса города*. В: Витченко АН и др. редакторы. *Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии. Материалы VI Международной научной конференции*. Минск: БГУ; 2018. с. 194–196.
4. Никаноров ВМ, Хоружая ТА. *Глобальная экология*. Москва: Книга сервис; 2003. 284 с.
5. Пасечная ЕА, Арсан ОМ. Накопление меди и марганца некоторыми погруженными высшими водными растениями и нитчатками водорослями. *Гидробиологический журнал*. 2003;39(3):65–73.
6. Титов АФ, Таланова ВВ, Казнина НМ. *Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН; 2011. 77 с.
7. Головатый СЕ, Гирис ДА. Закономерности накопления тяжелых металлов в растениях и организмах животных. *Природные ресурсы*. 2002;3:120–125.
8. Абакумов ВА. *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений*. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1983. 240 с.

9. Макаренко ТВ, Хаданович АВ, Пырх ОВ, Парфенкова АС. Анализ загрязнения тяжелыми металлами мягких тканей двусторчатых моллюсков в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022; 2:39–47.

10. Никаноров АМ, Жулидов АВ. *Биомониторинг металлов в пресноводных системах*. Ленинград: Гидрометеониздат; 1991. 312 с.

References

1. Makarenko TV, Hryshchanka IV, Makarenko AI, Nikitin AN. Study of the content of certain heavy metals in the soft tissue of the river (*Viviparus viviparus* L.) that inhabitates the river of Sozh in Gomel. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya*. [Journal of the Belarusian State University. Ecology]. 2021;1:29–39. Russian.

2. Misejko GN. *Biologicheskij analiz kachestva presnyh vod* [Biological analysis of fresh water quality]. Barnaul: Altai State University; 2001. 201 p. Russian.

3. Kadatskaya OV, Sanets EV, Ovcharova EP. *Gidrograficheskaja set' urbanizirovannyh territorij kak jelement formirovanija prirodnoho karkasa goroda* [Hydrographic network of urbanized territories as an element of the formation of the natural frame of the city]. In: Vitchenko AN, editor. *Sovremennye problemy landshaftovedenija I geojekologii. Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. Minsk: BSU; 2018. p. 194–196. Russian.

4. Nikanorov VM, Horuzhaya TA. *Global'naya ekologiya* [Global ecology]. Moscow: Kniga servis; 2003. 284 p. Russian.

5. Pasechnaya EA, Arsan OM. Accumulation of copper and manganese by some submerged higher aquatic plants and filamentous algae. *Gidrobiologicheskij zhurnal*. [Hydrobiological Journal]. 2003;39(3):65–73. Russian.

6. Titov AF, Talanova VV, Kaznina NM. *Fiziologicheskie osnovy ustojchivosti rastenij k tyazhyolym metallam* [Physiological foundations of plant resistance to heavy metals]. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN; 2011. 77 p. Russian.

7. Golovatyj SE, Giris DA. Zakonomernosti nakopleniya tyazhelyh metallov v rasteniyah i organizmah zhivotnyh. *Prirodnye resursy*. [Natural resources]. 2002;3:120–125. Russian.

8. Abakumov VA. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverhnostnyh vod i donnyh otlozhenij* [Guide to Methods for Hydrobiological Analysis of Surface Water and Bottom Sediments]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1983. 240 p. Russian.

9. Makarenko TV, Khadanovich AV, Pyrkh OV, Parfenkova AS. Analysis of heavy metal contamination of soft tissues of bivalve mollusks in water bodies of Gomel and adjacent territories. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;2:39–47. Russian.

10. Nikanorov AM, Zhulidov AV. *Biomonitoring metallov v presnovodnyh sistemah*. [Biomonitoring of metals in freshwater systems]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 312 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 21.04.2023.
Received by editorial board 21.04.2023.

УДК 504.064.2.001.18

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ КЛЕЩЕВЫХ ИНФЕКЦИЙ В ОТДЕЛЬНЫХ РЕГИОНАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В СВЯЗИ С ГЛОБАЛЬНЫМ ПОТЕПЛЕНИЕМ КЛИМАТА

И. Л. МАЛЬКОВА¹⁾, И. Ю. РУБЦОВА¹⁾, А. В. СЕМАКИНА¹⁾, Л. Н. ПЕТУХОВА¹⁾

¹⁾Удмуртский государственный университет,
ул. Университетская, 1, 426034, г. Ижевск, Россия

На примере отдельных регионов Российской Федерации (Удмуртской Республики, Пермского края, Свердловской обл. и др.) подтверждаются сведения о том, что вирусофорность популяций клещей-переносчиков клещевых зооантропонозных инфекций возрастает по мере увеличения суровости зимних условий. Чем холоднее зимы, тем опаснее штамм возбудителя и тяжелее заболевание. Летнее потепление приводит к активизации клещей, расширению их ареала и увеличению количества укусов. Однако зимнее потепление обеспечивает снижение степени тяжести течения заболеваний. Следует отметить, что изменения гидротермических условий последних десятилетий отражаются на динамике всех компонентов паразитарной системы клещевых зооантропонозов, оказывая как прямое, так и опосредованное влияние на показатель эпидемической напряженности в природных очагах клещевых инфекций. О пространственной трансформации природного очага говорят все три группы показателей активности иксодовых клещей: заболеваемость населения клещевыми зооантропонозами, число зарегистрированных укусов клещей и заклещевленность территории. По мере потепления климата продолжится рост заболеваемости клещевым энцефалитом (КЭ) и иксодовым клещевым боррелиозом (ИКБ) на северных границах ареала этих инфекций, в то время как в южных частях ареала могут создаваться неоптимальные условия для иксодовых клещей, что приведет к снижению заболеваемости клещевыми инфекциями на этих территориях. Возможно также появление на территории Российской Федерации возвратных боррелиозных лихорадок, переносимых аргасовыми клещами, обитающими в государствах Центральной Азии.

Ключевые слова: природно-очаговые болезни; клещевой энцефалит; природный очаг; изменение климата; трансформация ареала зооантропонозов.

Образец цитирования:

Малькова ИЛ, Рубцова ИЮ, Семакина АВ, Петухова ЛН. Особенности проявления клещевых инфекций в отдельных регионах Российской Федерации в связи с глобальным потеплением климата. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;2:16–24.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-16-24>

For citation:

Malkova IL, Rubtsova IJu, Semakina AV, Petuhova LN. Features of the manifestation of tic-born infections in certain regions of the Russian Federation in connection with global climate warming. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;2:16–24. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-16-24>

Авторы:

Ирина Леонидовна Малькова – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры экологии и природопользования.

Ирина Юрьевна Рубцова – кандидат географических наук, доцент; заведующий кафедрой экологии и природопользования.

Алсу Валерьевна Семакина – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры экологии и природопользования.

Лариса Николаевна Петухова – кандидат географических наук, доцент кафедры географии, картографии и геоинформатики.

Authors:

Irina L. Malkova, PhD (geography), docent; associate professor at the department of ecology and nature management.

mi.izhevsk@mail.ru

Irina Yu. Rubtsova, PhD (geography), docent; head of the department of ecology and nature management.

irrubcov@yandex.ru

Alsu V. Semakina, PhD (geography), docent; associate professor at the department of ecology and nature management.

alsen13@list.ru

Larisa N. Petukhova, PhD (geography), associate professor at the department geography, cartography and geoinformatics.

petlar75@mail.ru

FEATURES OF THE MANIFESTATION OF TIC-BORN INFECTIONS IN CERTAIN REGIONS OF THE RUSSIAN FEDERATION IN CONNECTION WITH GLOBAL CLIMATE WARMING

I. L. MALKOVA^a, I. Ju. RUBTSOVA^a, A. V. SEMAKINA^a, L. N. PETUHOVA^a

^aUdmurt State University,

1 Universitetskaja Street, Izhevsk 426034, Russia

Corresponding author: I. Ju. Rubtsova (irrubcov@yandex.ru)

On the example of many regions of the Russian Federation (Udmurt Republik, Perm Territory, Sverdlovsk Region and some others), information is confirmed that the virulence of tick-borne encephalitis viruses increases from the southwest to the northeast, as the severity of winter conditions increases. The colder the winters, the more dangerous the strain of the pathogen and the more severe the disease. The severity of tick-borne encephalitis increases as the «severity» of climatic conditions increases. That is, summer warming leads to the activation of ticks, the expansion of their range and an increase in the number of their bites. However, winter warming reduces the severity of the course of diseases, since the proportion of ticks containing low-virulent encephalitis viruses increases, which, in turn, reduces the incidence of the population due to mild, often not fixed forms, or the disease does not develop at all. That is, changes in hydrothermal conditions in recent decades affect the dynamics of all components of the arazitic system of tick-borne zoonothroponoses, exerting both direct and indirect influence on the level of epidemiological tension in natural foci of tick-borne infections. The spatial transformation of the natural focus is indicated by all three groups of indicators of the activity of ixodic ticks: the incidence of tick-borne zoonothroponoses in the population, the number of registered tick bites and the encrustation of the territory. As the climate warms, the incidence of CVE and ICB will continue to increase on the northern borders of the range of these infections, while in the southern parts of the range, suboptimal conditions for ixodic ticks may be created, which will lead to a decrease in the incidence of tick-borne infections in these territories. It is also possible that recurrent borreliosis fevers carried by argass ticks living in Central Asian countries may appear on the territory of the Russian Federation.

Keywords: natural focal diseases; tick-borne encephalitis; natural focus; climate change; transformation of the range of zoonothroponoses.

Введение

Проблема клещевых инфекций (клещевого энцефалита, иксодовых клещевых боррелиозов) продолжает оставаться актуальной для большинства субъектов Российской Федерации. В структуре природно-очаговых заболеваний на эту группу инфекций приходится 34,9 %¹. Только в 2019 г. клещевые инфекции уступили «лидирующие» позиции геморрагической лихорадке с почечным синдромом. При этом общая величина социально-экономических потерь, связанных с распространением инфекций, переносимых клещами, составляет 2,107 млрд руб. [1].

Ареал клещевых зооантропонозов преимущественно совпадает с ареалом основных переносчиков (рис. 1) – иксодовых клещей (*Parasitiformes, Ixodidae*) *Ixodes ricinus* (европейская часть) и *I. persulcatus* (частично европейская часть, Урал, Сибирь, Дальний Восток). В Сибири и на Дальнем Востоке в передаче вируса могут принимать участие клещи *I. pavlovskiyi*.

В условиях меняющегося климата природные очаги клещевых зооантропонозов подвержены существенной трансформации. Повышение зимних температур, увеличение количества осадков, особенно в летнее время, увеличение продолжительности теплого периода года в большинстве случаев благоприятно отразились на условиях обитания и численности таежных клещей^{2,3}. Изначальный ареал *Ixodes persulcatus* на территории России (от 42° до 62° с.ш.) сдвигается в более континентальные северо-восточные районы [3–6]. По прогнозам некоторых ученых к 2040–2060 гг. в Европе ожидается расширение ареала *Ixodes ricinus*, а к концу XXI в. северная граница ареала этого вида может достичь 70° с.ш. [7].

¹О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2019 году: Государственный доклад – Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Москва, 2020. 299 с.

²Коротков Ю. С. Экология таежного клеща (*Ixodes persulcatus* Schultze, 1930) в условиях изменения климата Евразии: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Москва, 2009. 46 с.

³Попов И. О. Климатически обусловленные изменения аутэкологических ареалов иксодовых клещей *Ixodes ricinus* и *Ixodes persulcatus* на территории России и стран ближнего зарубежья: автореферат дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2016. 22 с.

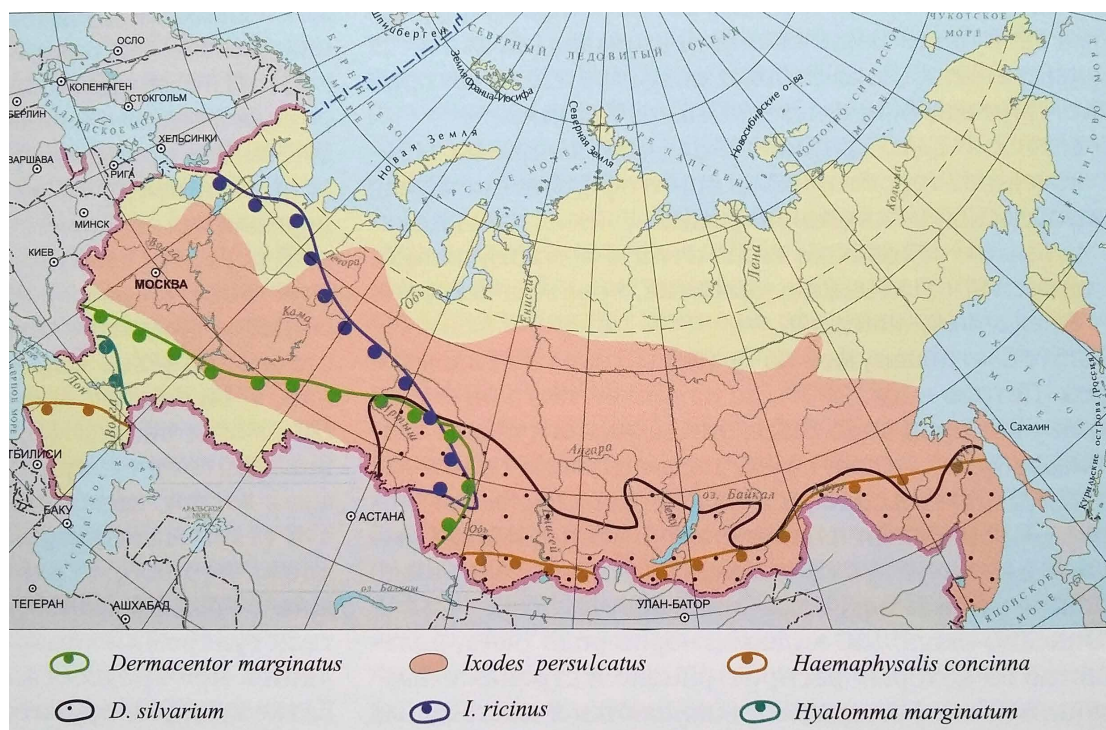


Рис. 1. Ареалы клещей на территории Российской Федерации [2]

Fig. 1. Tick ranges in the Russian Federation [2]

Материалы и методы исследования

Согласно Методическим рекомендациям 2.1.10.0057-12. 2.1.10. «Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения. Оценка риска и ущерба от климатических изменений, влияющих на повышение уровня заболеваемости и смертности в группах населения повышенного риска» (утв. Роспотребнадзором 17.01.2012), сбор информации о клещевых инфекциях должен включать: число пострадавших от нападения клещей, число заболевших КЭ и ИКБ, показатели обилия клещей («заклещевленность» территории), данные об инфицировании клещей вирусом клещевого энцефалита. В статье на основе официальной информации медико-статистической отчетности ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» и обзора региональных исследований дан анализ динамики этих групп показателей по отдельным субъектам Российской Федерации (Удмуртской Республики, Пермского края, Свердловской обл. и др.). Также задействованы данные натурных наблюдений за обилием клещей, проводимых авторами на территории Удмуртии в период с 2005 по 2020 гг.

Результаты исследования и их обсуждение

В последние десятилетия значительно выросло число лиц, пострадавших от укусов клещей. Число обращений граждан в медицинские учреждения с присосавшимися клещами возросло с 396 тыс. в 2013 г. до 580 тыс. в 2019 г. Наибольший рост количества укусов зафиксирован в Томской обл. (с 1413,90 до 2097,2 на 100 тыс. населения), в Калининградской обл. (на 56 %) и Красноярском крае (на 49,5 %). В 3–5 раз выше средних по Российской Федерации (395,34 на 100 тыс. населения) показатели в Республике Алтай, Костромской, Вологодской, Кировской, Тюменской, Кемеровской областях и в Удмуртской Республике⁴.

На территории Удмуртии число обращений по поводу присасывания клещей существенно возросло в последние годы в северо-восточных районах (Вятско-Камская южно-таежная провинция), хотя здесь плотность населения невысока. В 2019 г. заболеваемость в этих районах составила более 3000 случаев на 100 тыс. населения⁵. С востока к данному региону примыкают Еловский, Очерский и Верещагинский районы Пермского края с наиболее высокими показателями присасывания клещей (более 1000).

⁴О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2019 году: Государственный доклад – Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Москва, 2020. 299 с.

⁵О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия в Удмуртской Республике в 2020 году: Государственный доклад – Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Удмуртской Республике. Ижевск, 2021. 186 с.

Исследователи замечают увеличение продолжительности периода активности клещей за счет ранней активности и позднего ухода в диапаузу во многих регионах. Так, в Свердловской обл. этот период возрос со 177 дней в 2004 г. до 219 дней в 2014 г. (с конца марта по первую декаду ноября)⁶, в Удмуртии – со 160 до 220 дней [2].

Показатель заболеваемости КЭ в последнюю четверть XX в. в РФ вырос в 9 раз и достиг 10 тыс. случаев в год. К 2020 г. замечено снижение заболеваемости населения КЭ на территории всех эндемичных по данной инфекции субъектов РФ. В наиболее неблагоприятных (Томская обл. и Республика Алтай), снижение показателей произошло почти в 2 раза, однако показатель заболеваемости в 5 раз выше средних значений по субъектам РФ (1,21 на 100 тыс. населения)⁷. Крайне напряженная ситуация сохраняется в Красноярском крае, Кировской обл. и Республике Тыва, здесь уровень заболеваемости клещевым энцефалитом, несмотря на снижение, остается последние 10 лет на уровне 8,92–14,64 случая на 100 тыс. населения. Для территории Свердловской обл. многолетняя динамика заболеваемости КЭ (учитывались значения с 1990 г.)⁸ имела волнообразный характер, присутствует тенденция к снижению со среднегодовым темпом 3,5 %.

Многие исследователи считают, что присутствует связь изменений уровня заболеваемости населения КЭ с потеплением климата [8]. В Архангельской области среднегодовая температура в 1960–1989 гг. составила в среднем +0,7 °С. За период с 2000 по 2009 гг. значения поднялись до +2,0 °С. Синхронно с изменением температуры повысился показатель заболеваемости населения КЭ. Корреляционная связь между этими показателями за 1990–2009 гг. по центральным районам Архангельской области составили 0,71 [5]. Если в целом по России показатель заболеваемости в последние годы упал в 2 раза, то в Архангельской области он вырос в 3 раза [8].

В Иркутской обл. длительность безморозного периода увеличилась с 90–100 до 120–130 дней. По наблюдениям 1956–2003 гг., число иксодовых клещей возросло в 57,5 раз, а заболеваемость – в 40,2 раза [9]. Дальнейшее повышение среднегодовой температуры до +3,86 °С привело к существенному снижению показателей [10].

На территории Удмуртии также фиксируется существенное уменьшение показателя заболеваемости населения за последние 15 лет: клещевым энцефалитом – почти в 5 раз, клещевым боррелиозом – почти в 7 раз⁹. При этом за последние 50 лет не только возросла среднегодовая температура (рис. 2), но и увеличилось с 501 до 650 мм среднегодовое число осадков, возросла почти в 1,5 раза высота снежного покрова и уменьшилась глубина промерзания почвы [1; 5].



Рис. 2. Многолетние изменения среднегодовой температуры воздуха на территории г. Ижевска

Fig. 2. Long-term changes in the average annual air temperature in the city of Izhevsk

В период 1954–1964 гг. была зафиксирована первая волна высокого уровня заболеваемости клещевыми инфекциями в Удмуртии (рис. 3). Наиболее напряженная ситуация – на территории центральных и южных районов республики (рис. 4). Период низкой заболеваемости населения КЭ (с 1965 по 1986 гг.) объясняется

⁶Есюнина М. М. Современные тенденции заболеваемости клещевым вирусным энцефалитом в условиях различных тактик иммунизации и совершенствование эпидемиологического надзора и контроля: автореферат дис. ... канд. мед. наук. Екатеринбург, 2015. 153 с.

⁷О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2019 году: Государственный доклад – Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Москва, 2020. 299 с.

⁸Есюнина М. М. Современные тенденции заболеваемости клещевым вирусным энцефалитом в условиях различных тактик иммунизации и усовершенствование эпидемиологического надзора и контроля: автореферат дис. ... канд. мед. наук. Екатеринбург, 2015. 153 с.

⁹О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия в Удмуртской Республике в 2020 году: Государственный доклад – Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Удмуртской Республике. Ижевск, 2021. 186 с.

не только закономерным этапом развития эпидемического процесса в природном очаге, но и проведением интенсивных противоклещевых обработок. Пик второго «всплеска» уровня заболеваемости приходится на 1990-е гг. На фоне этой волны резкое снижение показателей в 1994–1995 гг. синхронизировано с низкими среднегодовыми температурами этого периода (рис. 2).

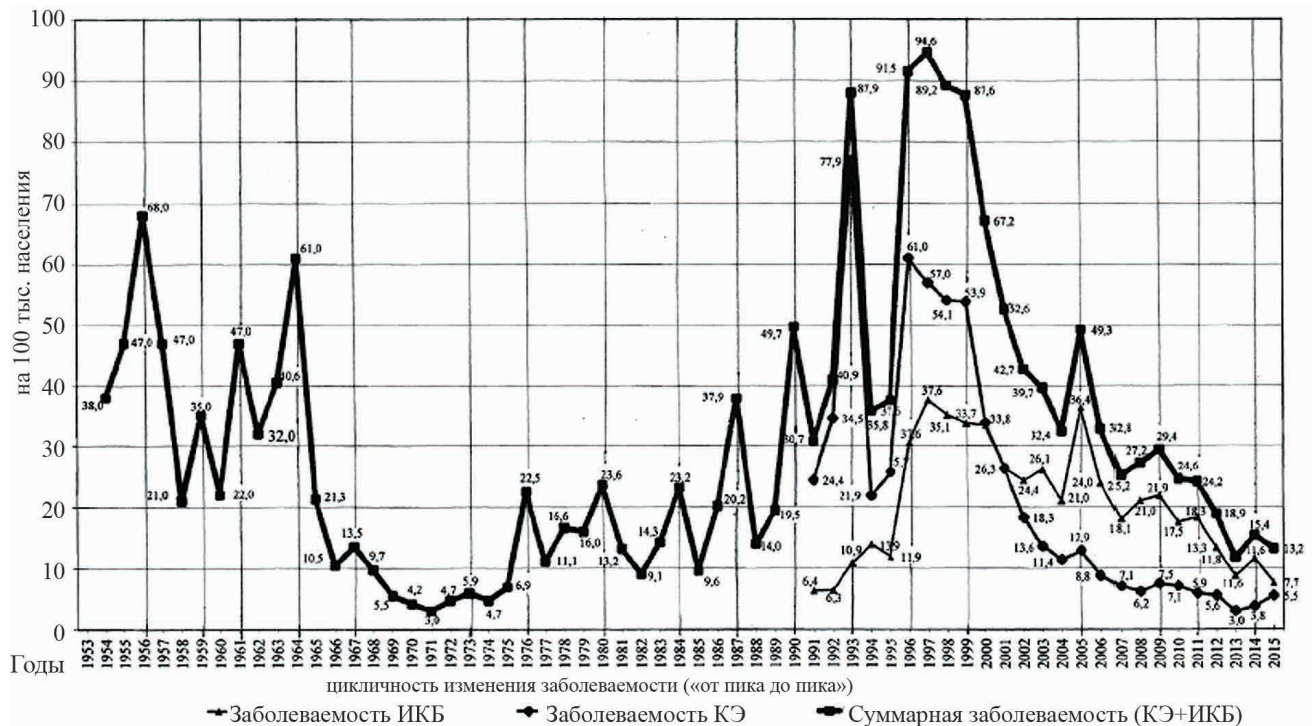


Рис. 3. Заболеваемость КЭ и ИКБ населения Удмуртии [12]

Fig. 3. Incidence of CVE and ICB in the population of Udmurtia [12]

При этом с конца 1990-х годов показатель заболеваемости населения северо-восточных районов Удмуртии превышает показатели юго-западных районов в 2–5 раз [11]. Так, в 2018 г. в Кезском (самом северо-восточном) районе заболеваемость КЭ равнялась 24,4 на 100 тыс. населения, что выше уровня среднереспубликанских показателей в 7 раз, заболеваемость ИКБ составила 58,5 на 100 тыс. населения, превышая средний показатель почти в 9 раз.

В Пермском крае при анализе структуры природно-очаговых болезней было выявлено, что доля клещевых инфекций снизилась с 68,9 % в 2011 г. до 51,4 % в 2020 г. Показатель заболеваемости КЭ в 2020 г. отмечен в 8,5 раз ниже среднего многолетнего уровня за 2016–2020 гг. (7,15 на 100 тыс. населения). Заболеваемость ИКБ снизилась в 3,6 раза по сравнению с 2019 г. (2,03 на 100 тыс. населения) и стала ниже среднего показателя по Российской Федерации (такое произошло впервые за весь период наблюдения)¹⁰.

На территории Пермского края выявили, что многолетняя динамика заболеваемости является циклической. Суммарная длительность цикла КЭ составляет 33–34 года. Он состоит из 13–14-летней фазы повышенной активности эпидемического процесса и 19–20-летней фазы пониженной активности (рис. 5)¹¹. Первые фазы высокого (1960–1968 гг.) и низкого (1970–1989 гг.) уровня заболеваемости населения КЭ практически не отличались по температурному режиму¹² – среднегодовая температура воздуха была в пределах 2,1–2,2 °С. Последующие фазы эпидемического процесса характеризовались повышением температуры. Причем на фазы спада (2003–2008 и 2017–2020 гг.) приходятся самые высокие значения температурного режима (3,5 и 3,3 °С соответственно). Это подтверждает неоднозначное влияние температурного фактора на активность клещей. В южных районах Пермского края (Частинском, Еловском, Бардымском, Уинском, Суксунском, Кишертском, Большесосновском) показатели уровня заболеваемости КЭ были одними из самых высоких и составляли в 2005 г. от 13,8 до 40,0 случаев на 100 тыс. населения, в 2020 г. в рейтинг наиболее неблагоприятных районов, кроме западных – Очерского и Сивинского, вошли северо-восточные

¹⁰О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия в Пермском крае в 2020 году: Государственный доклад: Управление Роспотребнадзора по Пермскому краю, ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Пермском крае». Пермь, 2021. 260 с.

¹¹ Там же.

¹² Там же.

(Чердынский и Красновишерский р-ны). Наиболее высокие показатели заболеваемости многие годы регистрируются на территории Очерского р-на (КЭ – от 51,8 (2005 г.) до 8,68 (2020 г.), ИКБ – 26,04 на 100 тыс. населения), расположенного на северо-восточной границе Кезского р-на Удмуртии.

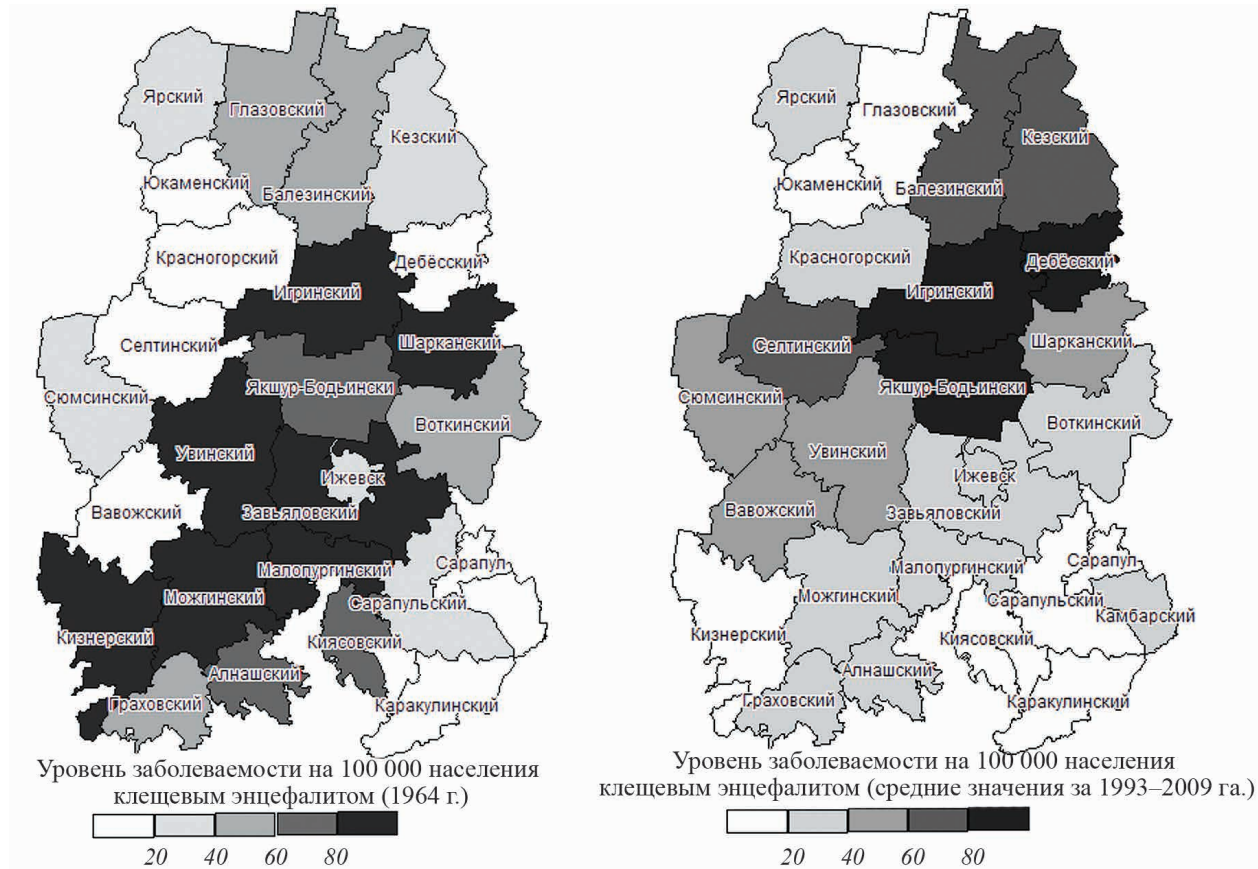


Рис. 4. Заболеваемость населения Удмуртии КЭ в разрезе административных районов [1]

Fig. 4. The incidence of the population of Udmurtia CVE in the context of administrative district [1]

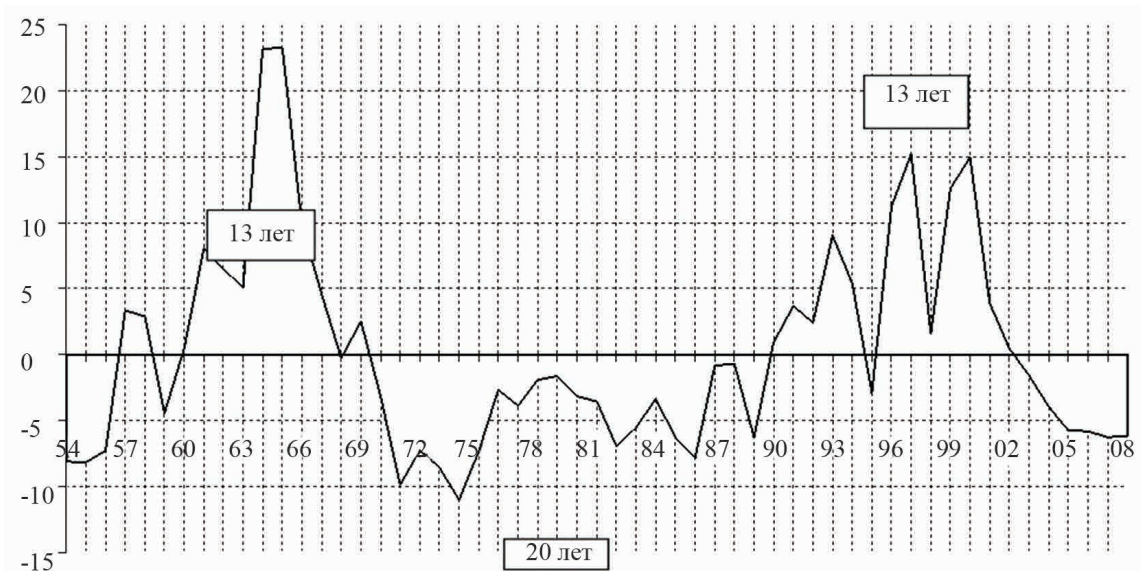


Рис. 5. Циклические проявления заболеваемости КЭ в Пермском крае за 1954–2008 гг.¹³

Fig. 5. Cyclic manifestations of the incidence of CVE in the Perm region for 1954–2008¹³

¹³О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия в Свердловской области в 2019 году: Государственный доклад – Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Свердловской области. Свердловск, 2020. 254 с.

Средняя заболеваемость КЭ по ландшафтно-климатическим подзонам Пермского края за последние 5 лет изменялся от 2,7 (средняя тайга) до 11,3 (южная тайга) на 100 тыс. населения (в зависимости от относительной численности клещей). В Кировской обл. 89 % заболеваний регистрируется в пределах природной зоны южной тайги, 8,5 % – средняя тайга, 2,5 % – хвойно-широколиственной зоны лесов [13].

Снижение уровня заболеваемости населения заболеваниями, переносимыми иксодовыми клещами, с начала 2000-х гг. во многих регионах происходит на фоне увеличения показателей заклещевленности территории. Так, по парковым и лесопарковым зонам г. Ижевска средняя численность клещей в период массовой активности увеличилась более чем в 2 раза – с 11,1 клещей на флаго/км в 2001 г. до 24,2 – в 2013 г. По данным Центра гигиены и эпидемиологии, на территории центральной Удмуртии максимальные значения уровня заклещевленности были зафиксированы в 2015 г.: в мае – 67,8 клещей на флаго/км, в июне – 54,7 клещей на флаго/км. В 2018 г. отмечено снижение в 1,5 раза количества отловленных на флаг клещей в мае – июне, но существенно выросла заклещевленность в июле – сентябре. Значительно выросли показатели заклещевленности в период массовой активности клещей в пределах ландшафтов южной тайги: с 3,3 до 27,5 шт. на флаго-час [1]. При этом показатели заклещевленности по ландшафтам таежной зоны Удмуртии остаются в 4,5 раза ниже, чем по подтаежной зоне.

В Свердловской обл. (по данным, полученным в стационарных пунктах наблюдения)¹⁴ в период с 2002 по 2012 гг. фиксировалось снижение уровня заклещевленности более чем в 3 раза. (рис. 6). Для подзоны осиново-березовых лесов зафиксировали сокращение обилия клещей с 14,3 до 0,4 на флаго/км. В лесной зоне максимальные значения зафиксированы для периода 2002–2009 гг. с резким дальнейшим снижением до 0,4–0,8 экземпляров на флаго/км в 2012 г. В последние годы самые высокие значения заклещевленности (6,6–26,7 клещей на флаго/км) отмечаются в подзоне северной лесостепи. Таким образом, по данным мониторинга 1990–2012 гг., наиболее эпидемически неблагоприятными являются юго-западные районы Свердловской обл. В сезоне 2019 г. заклещевленность колебалась от единичных экземпляров до 90 экз. на флаго/км (в 2018 г. – до 180 экз. на флаго/км) и соответствовала среднеголетнему уровню (1,3 экз. на флаго/км)¹⁵.



Рис. 6. Динамика средней численности клещей на маршрутах наблюдения в Свердловской обл.¹⁶

Fig. 6. Dynamics of the average number of ticks on observation routes in the Sverdlovsk region¹⁶

В Свердловской обл. при понижении уровня заклещевленности замечено снижение доли вирусофорных клещей. Число клещей, зараженных КЭ, снятых с населения снизилось с 32,4 % в 1990 г. до 4,4 % в 2019 г. Среди клещей, собранных из природных стаций, зафиксировано снижение показателей за

¹⁴О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия в Свердловской области в 2019 году: Государственный доклад – Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Свердловской области. Свердловск, 2020. 254 с.

¹⁵Там же.

¹⁶Есюнина М. М. Современные тенденции заболеваемости клещевым вирусным энцефалитом в условиях различных тактик иммунизации и усовершенствование эпидемиологического надзора и контроля: автореферат дис. ... канд. мед. наук. Екатеринбург, 2015. 153 с.

указанный период в 34 раза (до 1 %). На территории Удмуртии зараженность клещей вирусом клещевого энцефалита снизилась с 21 % (2012 г.) до 3,2 % (2018 г.). Число клещей с положительным результатом на клещевой боррелиоз в 2010–2013 гг. составляло 55–67 %, однако с 2014 г. этот показатель стабилизировался на уровне 30–40 %.

В последние годы существенные изменения претерпевает и клиническая картина клещевых инфекций [1; 4; 6]. В отдельных регионах (Удмуртия, Пермский край) растет число лихорадочных форм клещевого энцефалита с относительно менее тяжелым течением болезни и гораздо реже наблюдаются наиболее тяжелые формы. В Прибайкалье (административно это Иркутская обл. и Республика Бурятия) за 25-летний период наоборот произошло увеличение доли тяжелых (очаговых) форм с 5 % до 11 %. Среди клинических форм ИКБ значительно выросла доля безэритемных форм (с 0 до 50 %).

Таким образом, на примере многих регионов подтверждаются сведения о том, что вирусофорность популяции клещей возрастает с юго-запада на северо-восток, по мере увеличения суровости зимних условий. Чем холоднее зимы, тем опаснее штамм возбудителя и тяжелее заболевание. Тяжесть течения клещевого энцефалита возрастает по мере увеличения «суровости» климатических условий. Летнее потепление приводит к активизации клещей, расширению их ареала и увеличению количества их укусов. Однако зимнее потепление обеспечивает снижение степени тяжести течения заболеваний, и в целом официально регистрируемые показатели заболеваемости населения за счет легких, часто не фиксируемых форм энцефалита, либо заболевание совсем не развивается.

Заключение

Изменения гидротермических условий последних десятилетий отражаются на динамике всех компонентов паразитарной системы клещевых зооантропонозов, оказывая как прямое, так и опосредованное влияние на показатель эпидемической напряженности в природных очагах клещевых инфекций. О пространственной трансформации природного очага говорят все три группы показателей активности иксодовых клещей: заболеваемость населения клещевыми зооантропонозами, число зарегистрированных укусов клещей и заклещевленность территории. По мере потепления климата продолжится рост заболеваемости КЭ и ИКБ на северных границах ареала этих инфекций, в то время как в южных частях ареала могут создаться неоптимальные условия для иксодовых клещей, что приведет к снижению заболеваемости клещевыми инфекциями на этих территориях. Возможно также появление на территории Российской Федерации возвратных боррелиозных лихорадок, переносимых аргасовыми клещами, обитающими в странах Центральной Азии.

Библиографические ссылки

1. Малькова ИЛ, Рубцова ИЮ. *Медико-географическая оценка природных условий Удмуртии: монография*. Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет»; 2016. 212 с.
2. Малхазов СМ, редактор. *Медико-географический атлас России «Природноочаговые болезни»*. Москва: Географический факультет МГУ; 2015. 20 с.
3. Алексеев АН. Влияние глобального изменения климата на кровососущих эктопаразитов и передаваемых ими возбудителей болезней. *Вестник РАМН*. 2006;3:21–25.
4. Злобин ВИ, Данчинова ГА, Сунцова ОВ, Бадиева ЛБ. Климат как один из факторов, влияющих на показатель заболеваемости клещевым энцефалитом. В: *Изменение климата и здоровье России в XXI веке*. Москва: Издательское товарищество «АдамантЪ»; 2004. с. 121–124.
5. Малькова ИЛ, Рубцова ИЮ. *Трансформация природного очага клещевых инфекций как следствие изменения климата (на примере Удмуртии)*. Воронеж: Издательство «Цифровая полиграфия»; 2019. с. 355–358.
6. Ревич БА, Малеев ВВ. *Изменения климата и здоровье населения России. Анализ ситуации и прогнозные оценки*. Москва: ЛЕНАНД; 2011. 208 с.
7. Semenza JC, Suk JE. Vector-borne diseases and climate change. A European perspective. In: *FEMS Microbiology Letters*. [Place and publisher unknown]; 2018. p. 1–9.
8. Котцов ВМ, Гришина ЕА, Бузинов РВ, Гудков АБ. Эпидемиологические особенности клещевого вирусного энцефалита и его профилактика в Архангельской области. *Экология человека*. 2010;8:3–8.
9. Злобин ВИ. Клещевой энцефалит в Российской Федерации: современное состояние проблемы и стратегия профилактики. *Вопросы вирусологии*. 2005;3:26–31.
10. Мельникова ОВ, Вершинин ЕА, Корзун ВМ, Сидорова ЕА, Андаев ЕИ. Особенности территориального распределения заболеваемости клещевым энцефалитом среди жителей г. Иркутска. *Бюллетень ВСНЦ СО РАМН*. 2012;2(84):104–109.
11. Рысин ИИ, редактор. *Атлас Удмуртской Республики*. Москва: Феория; Ижевск: Удмуртия; 2020. 288 с.
12. Садыкова ЭТ, Мельникова ГИ, Молчанова ЛФ, Садыков ТТ. Динамика заболеваемости клещевыми инфекциями в Удмуртской Республике в последние 25 лет. *Здоровье, демография, экология финно-угорских народов*. 2016;2:22–27.
13. Оборин МС, Артамонова ОА. Анализ географических закономерностей распространения клещевого энцефалита и лайм-боррелиоза на территории России. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2016;1(135):87–92.

References

1. Malkova IL, Rubtsova IU. *Mediko-geograficheskaya otsenka prirodnykh uslovii Udmurtii: monografiya* [Medico-geographical assessment of the natural conditions of Udmurtia]. Izhevsk: Publishing Center «Udmurt University»; 2016. 212 p. Russian.
2. Malkhazov SM, editor. *Mediko-geograficheskii atlas Rossii «Prirodnoochagovye bolezni»* [Medico-geographical atlas of Russia “Natural focal diseases”]. Moscow: Geographical Faculty of Moscow State University; 2015. 20 p. Russian.
3. Alekseev AN. *Vliyaniye global'nogo izmeneniya klimata na krovososushchikh ektoparazitov i peredavaemykh imi vzbuditelei boleznei* [The impact of global climate change on blood-sucking ectoparasites and the pathogens transmitted by them]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2006;3:21–25. Russian.
4. Zlobin VI, Danchinova GA, Suntsova OV, Badueva LB. *Klimat kak odin iz faktorov, vliyayushchikh na pokazatel' zaboлеваemosti kleshchevym entsefalitom* [Climate as one of the factors influencing the incidence of tick-borne encephalitis]. In: *Climate change and health of Russia in the XXI century*. Moscow: Publishing Partnership «Adamant»; 2004. p. 121–124. Russian.
5. Malkova IL, Rubtsova IU. *Transformatsiya prirodnogo ochaga kleshchevykh infektsii kak sledstvie izmeneniya klimata (na primere Udmurtii)* [Transformation of the natural focus of tick-borne infections as a consequence of climate change (on the example of Udmurtia)]. Voronezh: Digital Polygraphy Publishing House; 2019. p. 355–358. Russian.
6. Revich BA, Maleev VV. *Izmeneniya klimata i zdorov'e naseleniya Rossii: Analiz situatsii i prognozyne otsenki* [Climate change and the health of the Russian population. Situation analysis and forecast estimates]. Moscow: LENAND; 2011. 208 p. Russian.
7. Semenza JC, Suk JE. Vector-borne diseases and climate change. A European perspective. In: *FEMS Microbiology Letters*. [Place and publisher unknown]; 2018. p. 1–9.
8. Kottsov VM, Grishina EA, Buzinov RV, Gudkov AB. *Epidemiologicheskie osobennosti kleshchevogo virusnogo entsefalita i ego profilaktika v Arkhangel'skoi oblasti* [Epidemiological features of tick-borne viral encephalitis and its prevention in the Arkhangelsk region]. *Human ecology*. 2010;8:3–8. Russian.
9. Zlobin VI. *Kleshchevoi entsefalit v Rossiiskoi Federatsii: sovremennoe sostoyaniye problemy i strategiya profilaktiki* [Tick-borne encephalitis in the Russian Federation: current state of the problem and prevention strategy]. *Questions of virology*. 2005;3:26–31. Russian.
10. Melnikova OV, Vershinin EA, Korzun VM, Sidorova EA, Andaev EI. *Osobennosti territorial'nogo raspredeleniya zaboлеваemosti kleshchevym entsefalitom sredi zhitelei g. Irkutsk* [Features of the territorial distribution of the incidence of tick-borne encephalitis among residents of Irkutsk]. *Bulletin of the VSNC SB RAMS*. 2012;2(84):104–109. Russian.
11. Rysin II, editor. *Atlas Udmurtskoi Respubliki* [Atlas of the Udmurt Republic]. Moscow: Feoria; Izhevsk: Udmurtia; 2020. 288 p. Russian.
12. Sadykova ET, Melnikova GI, Molchanova LF, Sadykov TT. *Dinamika zaboлеваemosti kleshchevymi infektsiyami v Udmurtskoi Respublike v poslednie 25 let* [Dynamics of the incidence of tick-borne infections in the Udmurt Republic in the last 25 years]. *Health, demography, ecology of the Finno-Ugric peoples*. 2016;2:22–27. Russian.
13. Oborin MS, Artamonova OA. *Analiz geograficheskikh zakonornostei rasprostraneniya kleshchevogo entsefalita i Laimborrelioz na territorii Rossii* [Analysis of geographical patterns of the spread of tick-borne encephalitis and Lyme borreliosis in Russia]. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2016;1(135):87–92. Russian.

Статья поступила в редколлегию 09.12.2022.
Received by editorial board 09.12.2022.

УДК 595.752.2(476)

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ДНК-ШТРИХКОДИРОВАНИЕ ЧУЖЕРОДНЫХ ВИДОВ АРНИДОИДЕА, ВКЛЮЧЕННЫХ В ЧЕРНУЮ КНИГУ ИНВАЗИВНЫХ ВИДОВ ЖИВОТНЫХ БЕЛАРУСИ

Д. Г. ЖОРОВ¹⁾, М. М. ВОРОБЬЁВА²⁾

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

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

В исследовании представлена информация о географических и биоэкологических особенностях 10 инвазивных видов тлей – вредителей декоративных, плодово-ягодных и сельскохозяйственных культур. Отмечено, что по трофической специализации большинство видов (*Brachycaudus (Acaudus) divaricatae* Shaposhnikov, 1956, *Panaphis juglandis* (Goeze, 1778), *Drepanosiphum platanoidis* (Schrank, 1801), *Phyllaphis fagi* (Linnaeus, 1767), *Hyadaphis tataricae* (Aizenberg, 1935), *Brevicoryne brassicae* (Linnaeus, 1758), *Cryptomyzus ribis* (Linnaeus, 1758)) относятся к числу высоко специализированных фитофагов. Преобладают филлобионтные виды (*Pemphigus spyrothecae* Passerini, 1856, *P. juglandis*, *D. platanoidis*, *Ph. fagi*, *H. tataricae*, *C. ribis*), принадлежащие к дендробионтной фитобионтной группе (*P. spyrothecae*, *P. juglandis*, *D. platanoidis*, *Ph. fagi*), тогда как дендрохортобионты (*B. divaricatae*), дендротамнобионты (*Aphis spiraecola* Patch, 1914), тамнобионты (*H. tataricae*), хортобионты (*B. brassicae*), тамнохортобионты (*C. ribis*) и дендротамнохортобионты (*A. craccivora*) представлены единичными видами. Для большинства чужеродных инвазивных тлей (*A. craccivora*, *A. spiraecola*, *B. divaricatae*, *B. brassicae*, *D. platanoidis*, *P. juglandis*, *Ph. fagi*) характерен открытоживущий образ существования, обитание в открытых галлах характерно для 2 видов (*H. tataricae*, *C. ribis*), а 1 адвентивный вид инициирует формирование закрытых галлов (*P. spyrothecae*). Большинство видов тлей рецентной фауны Беларуси характеризуется способностью к инициированию деформаций различных частей растений, а для 3-х видов (*H. tataricae*, *C. ribis*, *P. spyrothecae*) характерно формирование открытых и закрытых галлов. На сегодняшний день нуклеотидные последовательности гена COI имеются для 10 чужеродных инвазивных видов тлей для территории Беларуси, среди которых *B. divaricatae*, *P. juglandis* и *D. platanoidis* уже расшифрованы и депонированы в Международную базу данных нуклеотидных последовательностей (BOLDSystems). В рамках настоящего исследования расшифрованы нуклеотидные последовательности гена COI 5 видов тлей рецентной фауны Беларуси из числа чужеродных инвазивных видов (*B. divaricatae*, *P. juglandis*, *D. platanoidis*, *A. spiraecola*, *A. craccivora*).

Ключевые слова: инвазивный вид; тли; фитофаги; нуклеотидная последовательность; ген COI; фауна.

Образец цитирования:

Жоров ДГ, Воробьёва ММ. Экологические особенности и ДНК-штрихкодирование чужеродных видов Aphidoidea, включенных в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;2:25–39.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-25-39>

For citation:

Zhorov DG, Varabyova MM. Ecological characteristics and DNA barcoding of alien aphidoidea species included in the Black book of invasive animal species of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;2:25–39. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-25-39>

Авторы:

Дмитрий Георгиевич Жоров – кандидат биологических наук, доцент; заместитель начальника Главного управления науки; начальник отдела аспирантуры и докторантуры.

Мария Михайловна Воробьёва – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры биотехнологии биотехнологического факультета.

Authors:

Dmitrii G. Zhorov, PhD (biology), docent; deputy head of the Main directorate of science; head of the postgraduate and doctoral studies department.

zhorovdg@bsu.by

Maryia M. Varabyova, PhD (biology), docent; associate professor at the department of biotechnology, faculty of biotechnology.
masch.89@mail.ru

ECOLOGICAL CHARACTERISTICS AND DNA BARCODING OF ALIEN APHIDOIDEA SPECIES INCLUDED IN THE BLACK BOOK OF INVASIVE ANIMAL SPECIES OF BELARUS

D. G. ZHOROV^a, M. M. VARABYOVA^b

^aBelarusian State University,

4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bPolesky State University, 23 Dniaproŭskay flacilii Street, Pinsk 225710, Belarus

Corresponding author: D. G. Zhorov (zhorovdg@bsu.by)

The paper provides information on geographical and bio-ecological features of 10 invasive aphid species, which are pests of ornamental, fruit and agricultural crops. It is marked that according to trophic specialization most species (*Brachycaudus (Acaudus) divaricatae* Shaposhnikov, 1956, *Panaphis juglandis* (Goeze, 1778), *Drepanosiphum platanoidis* (Schrank, 1801), *Phyllaphis fagi* (Linnaeus, 1767), *Hyadaphis tataricae* (Aizenberg, 1935), *Brevicoryne brassicae* (Linnaeus, 1758), *Cryptomyzus ribis* (Linnaeus, 1758)) belongs to the highly specialized phytophages. Phyllobiont species (*Pemphigus spyrothecae* Passerini, 1856, *P. juglandis*, *D. platanoidis*, *Ph. fagi*, *H. tataricae*, *C. ribis*) predominate, belonging to the dendrobiont phytobiont group (*P. spyrothecae*, *P. juglandis*, *D. platanoidis*, *Ph. fagi*), whereas dendrochortobionts (*B. divaricatae*), dendrotamnobionts (*Aphis spiraecola* Patch, 1914), tamnobionts (*H. tataricae*), chortobionts (*B. brassicae*), tamnochortobionts (*C. ribis*) and dendrotamnochortobionts (*A. craccivora*) are represented by single species. Most alien invasive aphids (*A. cassivora*, *A. spiraecola*, *B. divaricatae*, *B. brassicae*, *D. platanoidis*, *P. juglandis*, *Ph. fagi*) are characterized by an open-living lifestyle, living in open galls is typical for 2 species (*H. tataricae*, *C. ribis*) and 1 adventive species initiates formation of closed galls (*P. spyrothecae*). Most species of aphids from the reentrant fauna of Belarus are noted to have the ability to initiate deformations of various plant parts, and 3 species (*H. tataricae*, *C. ribis*, *P. spyrothecae*) are characterized by the formation of open and closed galls. To date, the COI gene nucleotide sequences are available for 10 alien invasive aphid species for Belarus, including *B. divaricatae*, *P. juglandis*, and *D. platanoidis*, which have been decoded and deposited in the International Nucleotide Sequences Database (BOLDSystems). As part of this study, the nucleotide sequences of the COI gene of 5 aphid species of the recentral fauna of Belarus, among the alien invasive species (*B. divaricatae*, *P. juglandis*, *D. platanoidis*, *A. spiraecola*, *A. caccivora*) were decoded.

Keywords: invasive species; aphids; phytophagous; nucleotide sequence; COI gene; fauna.

Введение

Ограниченность таксономического и формового разнообразия древесно-кустарниковых растений аборигенной флоры Беларуси обусловила широкий размах интродукционных работ для мобилизации растительных ресурсов из других регионов планеты. В условиях нашей страны дендрологические испытания древесных растений-интродуцентов проводились в ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» и послужили основой для определения ассортимента древесных и кустарниковых растений, которые в настоящее время широко используется в озеленении городов и других населенных пунктов [1–4].

На сегодняшний день в условиях населенных пунктов Республики Беларусь декоративные зеленые насаждения общего и ограниченного пользования находятся преимущественно в неудовлетворительном, достаточно слабом состоянии, что обусловлено не только антропогенным загрязнением атмосферного воздуха и почвы, но и развитием на растениях различных вирусных заболеваний и микозов, а также повреждениями, инициированными вредными растительноядными членистоногими [5; 6]. Так как в ассортименте древесных и кустарниковых растений, использующихся в настоящее время в озеленении городов и других населенных пунктов Беларуси, широкое представительство имеют интродуценты, то создаются предпосылки для проникновения и натурализации связанных с ними чужеродных инвазивных видов-фитофагов, которые приводят к изменениям структурно-функционального состояния экосистем и выступают в качестве экономически значимых вредителей.

Проблема неконтролируемых биологических инвазий весьма актуальна в настоящее время как для территории Беларуси, так и сопредельных ей регионам [7]. В ряде стран мира созданы национальные и региональные «черные списки» и «черные книги» чужеродных инвазивных видов растений и животных. В Российской Федерации ввиду обширности территории и разнообразия природно-климатических условий регионов страны стали готовиться и издаваться региональные «черные книги» для отдельных субъектов федерации [8–10]. В Республике Беларусь первое издание «Черная книга инвазивных видов животных Беларуси» под научной редакцией член-корреспондента НАН Беларуси В. П. Семенченко вышло в свет в 2016 г., а статьи по отдельным инвазивным видам животных были также размещены на специализированном сайте <http://ias.by>. Второе издание «Черная книга инвазивных видов животных Беларуси»

под общей редакцией член-корреспондента НАН Беларуси В. П. Семенченко и профессора кафедры зоологии биологического факультета БГУ С. В. Буги вышло в свет в 2020 г. и было дополнено инвазивными видами – вредителями сельскохозяйственных культур, включая карантинные виды, а также инвазивными видами, наносящими социальный ущерб.

Поскольку чужеродные инвазивные виды обладают высокой пластичностью и скоростью размножения, то это позволяет им осуществлять экспансию на новые территории и в новые экосистемы, быстро увеличивать численность, подавлять или вытеснять аборигенные виды, а также наносить экономический, экологический и социальный ущерб. Возникает необходимость оценивать видовой состав и динамику численности вселившихся (или вселявшихся) на конкретную территорию видов, устанавливать ареал их распространения, особенности биологии и экологии, а также морфологический и генетический полиморфизм.

В настоящем исследовании описаны географические и биоэкологические особенности чужеродных инвазивных видов настоящих тлей фауны Беларуси, а также оценена представленность находящихся в открытом доступе в BOLDSystems нуклеотидных последовательностей гена COI этих видов и получены для них ДНК-штрихкоды.

Материалы и методы исследования

В основу настоящей работы положены сборы энтомологического материала в течение вегетационного сезона 2022 г., осуществленные по стандартным методикам с учетом специфики таксонов гемиптероидных насекомых на территориях Брестской обл. – Ляховичский р-н, д. Русиновичи; Лунинецкий р-н, д. Дятловичи; Кобринский р-н, д. Верхолесье; Минской обл. – г. Минск, г. Клецк; Узденский р-н, садовое товарищество «Красное урочище»; Могилевской обл. – г. Могилев, г. Кричев, Горецкий р-н, д. Староселье.

Сбор насекомых осуществляли главным образом в ходе визуального осмотра декоративных, плодово-ягодных и сельскохозяйственных культур на предмет наличия сосущих растительноядных вредителей или инициированных ими повреждений. Материал фиксировали в 75 и 96%-ном этаноле. Идентификацию таксономической принадлежности коллектированного материала проводили по соответствующим атласам-определителям, справочным пособиям и специализированным интернет-порталам [11–14].

Оценку представленности нуклеотидных последовательностей гена COI тлей из числа чужеродных инвазивных для территории Беларуси видов осуществили с использованием общедоступной международной базы данных нуклеотидных последовательностей – <http://www.boldsystems.org/>.

ДНК выделяли из пула в соответствии с протоколом производителя. Электрофорез молекул ДНК проводили в 1,5%-ном агарозном геле в TAE-буфере (40 mM Trisbase, 1 mM 0,5 M EDTA, H₂O) и окрашивали 10000×ZUBRGreen-1. Для оценки длин полученных фрагментов использовали маркер молекулярного веса (MP1bp DNALadder).

С целью получения целевого фрагмента гена COI использовали праймеры, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Праймеры, использованные для получения фрагмента COI

Table 1

Details of primers to amplify COI region of aphids

Название праймера	Последовательность праймера, 5'–3'	T _a °*	Размер получаемого фрагмента, пары нуклеотидов
HCO2198 LCO1490	TAAACTTCAGGGTGACCAAAAAATCA GGTCAACAAATCATAAAGATATTGG	50	708

Примечание. *T_a – температура отжига праймеров.

Реакционная смесь для ПЦР содержала в 25 мкл: 3 mM dNTP, 1 мкл каждого праймера, 2,5 mM MgCl₂, 1×TaqBuffer (10 mM Tris-HCl, 50 mM KCl, 0,8 % Nonidet P40), 1U Taq-полимеразы, 0,5 мкг ДНК-матрицы.

ПЦР проводили в режиме: 94 °C – 3 мин; 35 циклов по 94 °C – 20 с, отжиг праймера – 40 с, 72 °C – 1 мин 30 с; 72 °C – 5 мин.

Секвенирование ПЦР-продуктов выполнялось компанией *Macrogen* (Нидерланды) с использованием праймеров HCO2198/LCO1490.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № B22MB-013).

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам сборов энтомологического материала и согласно аннотированному списку, приведенному в Черной книге инвазивных видов животных Беларуси, статус инвазивных имеют 10 видов настоящих тлей, которые требуют ежегодного мониторинга популяций в зеленых насаждениях. Ниже приведена информация о географических и биоэкологических особенностях инвазивных видов тлей – вредителей декоративных, плодово-ягодных и сельскохозяйственных культур. Кроме того, была оценена представленность нуклеотидных последовательностей гена COI в online генбанке для исследуемых видов тлей, включенных в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси, что представлено в табл. 2–11.

***Pemphigus spyrothecae* Passerini, 1856 (Aphidoidea: Eriosomatidae).** Тополь пирамидальный, или итальянский (*Populus pyramidalis* Roziér, *Populus pyramidalis* Borkh., syn. *Populus nigra* var. *italica* Münchh., *Populus italica* (Münchh.) Moench, *Populus italica* (Du Roi) Moench, *Populus nigra* subsp. *pyramidalis* Čelak.) – двудомный вид листопадного древесного растения семейства Salicaceae, распространение которого ограничено территориями Средиземноморья, Кавказа, Средней Азии, Афганистана и Ирана, где естественно произрастает вдоль рек, каналов и арыков [15]. В Беларуси тополь пирамидальный используется в зеленом строительстве для создания зеленых изгородей вдоль автомобильных дорог и магистралей, аллей – в парках, скверах и т. д., а также другие представители рода тополь (*Populus* L.), поскольку они хорошо произрастают в условиях городской среды, устойчивы к антропогенным загрязнениям воздуха газами, пылью и дымом, обладают хорошими декоративными свойствами и отличаются быстрыми темпами роста, что позволяет достигать им больших размеров [3].

Региональная афидофауна надсемейства Eriosomatidae в условиях Беларуси представлена 27 видами из 12 родов [16], среди которых 4 вида рода *Pemphigus* Hart. являются инвазивными [17]. Представители рода *Pemphigus* характеризуются формированием на листовых пластинках, черешках и побегах тополей (*Populus* spp.: Salicaceae) плотно закрытых, разнообразных по форме и окраске галлов. Среди инвазивных видов галлообразующих эриосоматид в условиях зеленых насаждений Беларуси чаще всего отмечается и вредит декоративным посадкам тополей – поздний спиральногалловый пемфиг (*P. spyrothecae*), включенный в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси [18; 19].

P. spyrothecae характеризуется голоциклическим однодомным биологическим циклом с зимовкой на стадии яйца. По трофической специализации принадлежит к числу узких олигофагов, относящихся к дендробионтной фитобионтной группе. Это филлобионтный вид с четко выраженной способностью к тератогенности, которая проявляется в виде формирования на черешках листьев характерной формы спирально-шаровидных или спирально-веретеновидных, с толстой стенкой закрытых галлов, имеющих светло-зеленую, иногда – красноватую окраску.

Регионом происхождения позднего спиральногаллового пемфига считается Средиземноморье. В настоящее время *P. spyrothecae* отмечен на территории Северной (Норвегия, Финляндия, Швеция), Юго-Восточной (Болгария, Босния и Герцеговина, Македония, Молдова, Румыния), Южной (Португалия), Западной (Бельгия, Великобритания, Ирландия) и Центральной (Беларусь, Венгрия, Германия, Дания, Латвия, Литва, Польша, Словакия, Словения, Украина, Чехия, Эстония, Швейцария) Европы, в Центральной, Северо-Западной и Южной части Европейской России [20], проник он в Азербайджан, Западную Сибирь, Иран, Казахстан, Нидерланды, Пакистан, Сербию, Юго-Восточную часть Европейской России [21].

Таблица 2

Оценка представленности в BOLDSystems последовательностей гена COI *Pemphigus spyrothecae* Passerini, 1856

Table 2

Assessment of COI gene sequence representation in BOLDSystems *Pemphigus spyrothecae* Passerini, 1856

Семейство/вид	Количество последовательностей	Страна-коллектор
Aphididae / <i>P. spyrothecae</i>	1	Греция
	24	Канада
	4	США

***Brachycaudus (Acaudus) divaricatae* Shaposhnikov, 1956 (Aphidoidea: Aphididae).** Слива растопыренная, или алыча (*Prunus divaricata* Ledeb.; syn. *Prunus cerasifera* Ehrh.) – плодоевое деревянистое растение семейства Rosaceae. Является одной из самых ценных культурных форм, благодаря скороплодности и устойчивости к неблагоприятным условиям среды. Естественно произрастает на Кавказе, в горах Средней и Малой Азии, Иране и на Балканском полуострове [1]. В Беларуси выращивается главным образом как плодоевое

растение, но благодаря раннему и пышному цветению цениться и в зеленом строительстве. Алычу можно использовать как для одиночных посадок, так и для создания высоких живых изгородей или защитных полос. В рецетной фауне Беларуси присутствуют по меньшей мере два чужеродных вида рода *Brachycaudus* van der Goot (*B. divaricatae* и *B. (Appelia) prunicola* (Kalt.)), которые подпадают под определение инвазивных и повреждают алычу [17]. Первый включен в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси [18; 19].

B. divaricatae в условиях Беларуси характеризуется голоциклическим сокращенно однодомным биологическим циклом с зимовкой на стадии яйца [22]. По трофической специализации принадлежит к числу монофагов, относящихся к дендрохортобионтной фитобионтной группе. Это открытоживущий меристемофильный вид с выраженной способностью к деформации листовых пластинок. Поврежденные листья краснеют или обесцвечиваются, побеги зачастую прекращают рост и в дальнейшем отмирают.

Регионом происхождения алычево-дремовой тли считается Прикаспийский регион (север Передней Азии). Вместе с кормовым растением *B. divaricatae* распространился в Восточную Европу (Украина) [20], Грузию, Кавказ, Литву, Польшу, Турцию, Юго-Восточную часть Европейской России [21], отмечен в Чехии, Северо-Западной и Восточной части Балтийского побережья [14].

Таблица 3

Оценка представленности в BOLDSystems последовательностей гена COI *Brachycaudus (Acaudus) divaricatae* Shaposhnikov, 1956

Table 3

Assessment of COI gene sequence representation in BOLDSystems *Brachycaudus (Acaudus) divaricatae* Shaposhnikov, 1956

Семейство / вид	Количество последовательностей	Страна-коллектор
Aphididae / <i>B. (A.) divaricatae</i>	156	Литва
	2	Беларусь

Расшифрована и депонирована в BOLDSystems нуклеотидная последовательность тли *B. divaricatae* (Минск, код доступа: TLAPH001-15), коллектированной на территории Беларуси:

1 gtatttgatc aggtataatt ggatcatcac ttagaatctt aattcgtctt gaattaagac
61 aaattaatc aattattaat aataatcaat tatataatgt tattgttaca attcacgctt
121 ttattataat ttttttata acaataccaaa ttgttattgg tggatttga aattggtaa
181 ttctataat aatagatgt cctgatataa ctttcccacg attaaataac attagattct
241 gattattacc accctatta ataataataa ttgttagttt ttaattaat aatggaacag
301 gaacaggatg aactatttac ccaccctat caaataatat tgcacataat aatatttcag
361 ttgatttaac tatttttca ttacatttag caggaatttc atcaattta ggagcaatta
421 atttatttg tacaatctta aatataatac caaacaatat aaaattaac caaatccctt
481 tatttcatg atcaattta attacageta ttttattaat tttatctta cctgttctag
541 caggtgctat tacaatatta ttaactgatc gtaatttaaa tacttcattt ttgaccag.

***Panaphis juglandis* (Goeze, 1778) (Aphidoidea: Drepanosiphidae).** Естественный ареал ореха грецкого (*Juglans regia* L.) предположительно ограничен территорией Восточного Средиземноморья и отдельными регионами Передней и Средней Азии, откуда он распространился, преимущественно в культуре как на восток, так и на запад. В Беларуси местами выращивается, преимущественно на юге и западе страны, в качестве орехоплодной культуры. К настоящему времени в условиях республики орех грецкий повреждается двумя видами настоящих тлей – большой (пестрой) ореховой тлей (*Panaphis juglandis* (Goeze, 1778)) и нижней ореховой тлей (*Chromaphis juglandicola* Kaltentbach, 1843), иногда колонизирующий орех серый (*Juglans cinerea* L.) и некоторые другие виды *Juglans* L. Большая (пестрая) ореховая тля подпадает под определение инвазивного и включена в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси [18; 19].

P. juglandis в условиях Беларуси характеризуется голоциклическим однодомным биологическим циклом с зимовкой на стадии яйца. По трофической специализации принадлежит к числу монофагов, относящихся к дендробионтной фитобионтной группе. Это открытоживущий филлобионтный вид не способный к проявлению тератогенных свойств. Питание тлей ведет к потере растениями значительного количества пластических веществ; высокая численность этих сосущих фитофагов на листовых пластинках, приводит к преждевременному их желтеют и опад.

Регионом происхождения большой (пестрой) ореховой тли считается Средиземноморье. В настоящее время *P. juglandis* отмечен на территории Северной (Швеция), Юго-Восточной (Болгария, Босния и Герцеговина, Македония, Молдова, Румыния), Южной (Португалия), Западной (Бельгия, Великобританию) и Центральной (Австрия, Венгрия, Германия, Дания, Польша, Словакия, Словения, Украина, Чехия, Швейцария)

Европы [20], в Сербии [23], проник в Азербайджан, Афганистан, Грузию, Иордан, Иран, Казахстан, Киргизию, Крым, Нидерланды, Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан [21], также регистрируется в Пакистане, Северо-Западной Индии, завезен в Северную Америку [14].

Таблица 4

Оценка представленности в BOLDSystems последовательностей гена COI *Panaphis juglandis* (Goeze, 1778)

Table 4

Assessment of COI gene sequence representation in BOLDSystems *Panaphis juglandis* (Goeze, 1778)

Семейство/вид	Количество последовательностей	Страна-коллектор
Aphididae / <i>P. juglandis</i>	1	Греция
	2	Франция
	3	Германия
	2	Беларусь
	1	Индия
	1	Корея
	1	Грузия
	1	США
	1	Болгария
	1	Италия

Расшифрована и депонирована в BOLDSystems нуклеотидная последовательность тли *P. juglandis* (Минск, код доступа: MF377444), коллектированной на территории Беларуси:

1 tctctttaa gaatttaaat tcgattagaa ttaagcccaa ttaattcaat tattaataat
61 aaccaattat ataagttaat tgtaacaat catgcttita ttataatttt tttataact
121 atacctattg taattggagg gtttggaat tgattaatc cattaataat aggatgtcca
181 gatataatcat tccacgatt aaataatatt agattttgac tttacctcc atctttaata
241 ataataattt ctgattttt aattaataat ggtacagga caggttgaac aattatcca
301 cctctctcaa ataacattgc acataataat atttcagttg atttaacaat ttctcatta
361 cacttagcag gaatctcadc aattttagga gctattaatt ttattgtac aattccta
421 ataataccaa ataatttaa attaatcaa attccattat tccctgac aattfaatt
481 actgctatt tactaattat ttactacca gttttagctg gtgccattac aatactatta
541 actgaccgaa acctaaatac atctttttt gatccatcag gaggaggtga tccaattta
601 tataacatt tattctgatt ttttggtccc c.

***Drepanosiphum platanoidis* (Schrank, 1801) (Aphidoidea: Drepanosiphidae).** Клен ложноплатановый, или явор (*Acer pseudoplatanus* L.), как и другие клены (*Acer* L.), в настоящее время принадлежат к семейству Сapiндовые (Sapindaceae). Явор естественно произрастает в Прикарпатье и других регионах Центральной, Западной и Южной Европы. В условиях Беларуси спорадично встречается в зеленых насаждениях преимущественно в южной и западной части страны. В пределах региона повреждается двумя видами тлей, специализированных к развитию на данном растении, один из которых – *Drepanosiphum platanoidis* (Schrank, 1801) включен в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси [18; 19]. Еще один вид, *Periphyllus testudinaceus* (Fern.), нередко колонизирует интенсивно растущие побеги явора, но формируемые колонии выглядят ослабленными, развитие на *A. pseudoplatanus* хотя бы одной генерации оказывается проблематичным.

D. platanoidis характеризуется голоциклическим прерывисто однодомным циклом развития с диапаузой имаго виргинопарного поколения. Зимовка осуществляется на стадии яйца. По трофической специализации принадлежит к числу монофагов, относящихся к дендробионтной фитобионтной группе. Это открытоживущий филлобионтный вид, не способный к проявлению тератогенных свойств. При большой плотности тли продуцируют значительное количество медвяной росы, на которой, как правило, развиваются сажистые и дрожжевые грибы, что приводит к изменению декоративные свойства растений.

Регионом происхождения большой яворовой тли считается Западная и Центральная Европа. В настоящее время *D. platanoidis* отмечен на территории Северной (Норвегия, Финляндия, Швеция), Юго-Восточной (Болгария, Молдова, Румыния) и Центральной (Австрия, Беларусь, Венгрия, Германия, Дания, Латвия, Литва, Польша, Словакия, Словения, Украина, Чехия, Эстония, Швейцария) Европы, в Турции [20], Сербии и Черногории, Центральной части Европейской России [21], также регистрируется в Северной Африке, Центральной Азии, США, Новой Зеландии, Австралии [14].

Оценка представленности в BOLDSystems последовательностей гена COI *Drepanosiphum platanoidis* (Schrank, 1801)

Table 5

Assessment of COI gene sequence representation in BOLDSystems *Drepanosiphum platanoidis* (Schrank, 1801)

Семейство/вид	Количество последовательностей	Страна-коллектор
<i>Drepanosiphidae</i> / <i>D. platanoidis</i>	205	Канада
	2	Великобритания
	1	Польша
	1	Китай
	1	США
	1	Беларусь
	2	Норвегия
	1	Грузия
	1	Новая Зеландия

Расшифрована и депонирована в BOLDSystems нуклеотидная последовательность тли *D. platanoidis* (Минск, код доступа: MF377444), коллектированной на территории Беларуси:

```

1 gccaagtact acgtcacat cattgatgca cctggacaca gagattcat aagaagcatg
61 atcaccgta cctcccaagc tgattgtgct gtactattg ttgctgcccg tactggagaa
121 ttggaagctg gtatttccaa gaatggacaa acccgtgaac acgctctgtt ggctttcact
181 ctgggtgta aacaattgat tgttggtgtg aacaagatgg attcactga acctccgtac
241 agcgaagtat gattctaatt tacttatatt tatttgatta tttactaat ctgtgttta
301 cataatttta gtctcgttc gaagaaatca agaaggaagt cagcagttac atcaaaaaga
361 ttggttaca tccagctgcc gttgcttcg tacccatctc tggatggaac ggagacaaca
421 tgttgaagt ttccgaaaa atgtcttggg tcaagggatg gaatgtgaa cgtaaagaag
481 gaaaggctga cggtaaatgt tgattgaag ctttggatgc taccctccca cctagtcgcc
541 caactgacaa ggctctccgt ctcccactcc aggtacatta caactaaag ttactattga
601 ctttatttg ctaattttt ttctgaatt tgttaggac gtttcaaaa ttggaggtat
661 tggaacagtc ccagtgggcc gtgtggagac tgggttttg aaaccagga ctgtgtggt
721 ttctgcacc gccaac.

```

***Phyllaphis fagi* (Linnaeus, 1767) (Aphidoidea: Drepanosiphidae).** Бук европейский, или лесной (*Fagus sylvatica* L.), принадлежит к числу лесообразующих пород и является характерным компонентом смешанных лесов. Естественно произрастает на Карпатах, в горных местах Южной, Западной и Центральной Европы, в Южной Скандинавии [24]. В Беларуси принадлежит к числу интродуцентов. Изредка, наряду с буком крупнолистным (*Fagus grandifolia* Ehrh.), используются в озеленении. В условиях страны повреждается одним специализированным к развитию на представителях рода *Fagus* L. видом тлей – *Phyllaphis fagi* (Linnaeus, 1767), который включен в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси [18; 19].

Ph. fagi в условиях Беларуси характеризуется голоциклическим прерывисто однодомным циклом развития с диапаузой личинок виргинопарного поколения. Зимовка осуществляется на стадии яйца. По трофической специализации принадлежит к числу монофагов, относящихся к дендробионтной фитобионтной группе. Это открытоживущий филлобионтный вид, способный к проявлению тератогенных свойств. При интенсивном заселении тлями, побеги замедляют рост, искривляются, а листовые пластинки деформируются, – свертываются в продольные трубки, верхней стороной наружу; декоративность поврежденных растений дополнительно снижается еще за счет того, что колонии тлей укрыты обильным восковым пухом; при высокой численности тлей, продуцируют значительное количество пади, на которых массово развиваются сажистые грибы.

Регионом происхождения буковой тли считается Западная и Центральная Европа. В настоящее время *Ph. fagi* регистрируется на территории Северной (Норвегия, Финляндия, Швеция), Юго-Восточной (Болгария, Молдова, Румыния) и Центральной (Австрия, Венгрия, Германия, Дания, Польша, Словакия, Словения, Украина, Чехия, Эстония, Швейцария) Европы, Европейской части России и Турции [20], отмечен в Иране, Крыму, Латвии, Литве, Македонии, Сербии, Черногории и Японии [21], регистрируется на Кавказе, в Китае и Корее, завезен в Австралию, Новую Зеландию и Северную Америку [14].

Таблица 6

Оценка представленности в BOLDSystems последовательностей гена COI *Phyllaphis fagi* (Linnaeus, 1767)

Table 6

Assessment of COI gene sequence representation in BOLDSystems *Phyllaphis fagi* (Linnaeus, 1767)

Семейство/вид	Количество последовательностей	Страна-коллектор
Drepanosiphidae / <i>Ph. fagi</i>	2	Франция
	47	Канада
	1	Китай
	1	Великобритания
	1	Южная Корея
	7	Германия
	1	Новая Зеландия

***Hyadaphis tataricae* (Aizenberg, 1935) (Aphidoidea: Aphididae).** Естественный ареал жимолости татарской (*Lonicera tatarica* L.) ограничен регионами Приуралья и Поволжья. В Беларусь она была интродуцирована в целях использования в зеленом строительстве. Ранее жимолость татарская была широко представлена в декоративных насаждениях в составе зеленых изгородей, особенно на железнодорожных станциях и остановочных пунктах. В настоящее время все реже вводится в насаждения ввиду невысоких эстетических качеств, в том числе вследствие повреждения вредителями (преимущественно тлями). В условиях Беларуси *L. tatarica* повреждается 4 видами жимолостных тлей, один из которых *Hyadaphis tataricae* (Aizenberg, 1935) включен в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси [18; 19].

H. tataricae в условиях Беларуси характеризуется голоциклическим однодомным биологическим циклом с зимовкой на стадии яйца. По трофической специализации принадлежит к числу монофагов, относящихся к тамнобионтной фитобионтной группе. Это филлобионтный вид с выраженной способностью к проявлению тератогенных свойств. Колонии тлей располагаются на листовых пластинках, в результате чего последниегибаются, формируя «лодочку». Интенсивно заселенные побеги начинают сильно ветвиться; побеги и листья мельчают; в местах питания насекомых развиваются характерные хлоротичные пятна.

Регионом происхождения верхушечной жимолостной тли считается Урал и Приуралье. Вместе с кормовым растением *H. tataricae* распространился на территорию Северной (Финляндия, Швеция), Юго-Восточной (Болгария, Румыния) и Центральной (Венгрия, Германия, Латвия, Литва, Молдова, Польша, Словакия, Словения, Украина, Чехия) Европы, Европейской части России [20], проник в Беларусь, Казахстан, Кыргызстан, Узбекистан, Центральную и Юго-Восточную часть Европейской России, Центральную и Западную Сибирь [21], отмечен в Центральной Азии и Северной Америке [14].

Таблица 7

Оценка представленности в BOLDSystems последовательностей гена COI *Hyadaphis tataricae* (Aizenberg, 1935)

Table 7

Assessment of COI gene sequence representation in BOLDSystems *Hyadaphis tataricae* (Aizenberg, 1935)

Семейство / вид	Количество последовательностей	Страна-коллектор
Aphididae / <i>H. tataricae</i>	3	США
	1	Южная Африка
	10	Канада

***Aphis spiraeicola* Patch, 1914 (Aphidoidea: Aphididae).** В условиях городской среды для создания живых изгородей наиболее часто используют представителей семейства Rosaceae: спиреи, кизильники, айву и др. Спиреи (*Spiraea*) широко распространены в Европе, но не представлены в аборигенной флоре Беларуси. Они были интродуцированы для зеленого строительства. Ранее в зеленых изгородях широко использовалась спирея иволистная (*Spiraea salicifolia* L.), реже – белая (*Spiraea alba* Du Roi). В настоящее время в декоративных посадках широко представлены спиреи Аргута (*Spiraea × arguta* Zbl.), Вангутта (*Spiraea × vanhouttei* (Briot.) Zbl.), дубравколистная (*Spiraea chamaedrifolia* L.), японская (*Spiraea japonica* L.) и др. Помимо спирей, в бордюрных посадках, а также в подстригаемых зеленых изгородях широко используются кизильники блестящий

(*Cotoneaster lucidus* Schltdl.) и черноплодный (*Cotoneaster melanocarpus* Fisch. et A. Blytt). Изредка встречаются в декоративных насаждениях и принадлежит к числу нетрадиционных плодово-ягодных культур, рекомендованных к возделыванию в условиях Беларуси, айва низкая (*Chaenomeles maulei* (Mast.) C. K. Schneid.) и японская (*Chaenomeles japonica* (Thumb.) Lindl. Et. Spach). В условиях Беларуси плодово-ягодные и декоративные растения семейства Rosaceae повреждают два вида зеленых тлей рода *Aphis* L. – *Aphis pomi* Deg. и *Aphis spiraeicola* Patch. Последний включен в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси [18; 19].

A. spiraeicola в условиях Беларуси характеризуется факультативно аномоциклическим биологическим циклом с зимовкой на стадии яйца и (или) личинки. По трофической специализации принадлежит к числу полифагов, относящихся к дендротамнобионтной фитобионтной группе. Это открытоживущий меристемофильный вид с выраженной способностью к тератогенности. Колонизация тлями ведет к сильному ослаблению и угнетению растений, потере пластических веществ; нарушается рост, в садовых посадках (лечебное садоводство) снижается урожайность; питание фитофагов приводит к деформации листовых пластинок – они искривляются и закручиваются. Переносчик более 10 вирусных заболеваний растений [25].

Зеленая цитрусовая тля принадлежит к числу криптогенных видов. В настоящее время *A. spiraeicola* распространилась в субтропики и тропики Восточной Азии, тропической и субтропической области Африки, Южной, Центральной и Северной Америке, Австралии, Океании, Средиземноморье, Западной и Центральной Европе [20; 21; 23, 26].

Таблица 8

Оценка представленности в BOLDSystems последовательностей гена COI *Aphis spiraeicola* Patch, 1914

Table 8

Assessment of COI gene sequence representation in BOLDSystems *Aphis spiraeicola* Patch, 1914

Семейство/вид	Количество последовательностей	Страна-коллектор
Aphididae / <i>A. spiraeicola</i>	43	Австралия
	4	Греция
	8	Китай
	97	Пакистан
	3	Италия
	140	Канада
	159	Южная Африка
	63	Германия
	62	США
	48	Бангладеш
	14	Тунис
	8	Франция
	4	Греция
	4	Россия
	7	Индонезия
	15	Аргентина
	7	Индия
	13	Малайзия
	12	Новая Зеландия
4	Бразилия	
4	Коста-Рика	
12	Исландия	

Расшифрована нуклеотидная последовательность гена COI тли *A. spiraeicola*, коллектированной на территории Беларуси:

1 taaagatatt ggaactttat attttttatt tggatttga tcaggaataa ttggatcttc
61 acttagaatt tggattcgat tagaactaag tcaaatcaat tcaattatca ataataacca

121 attatataat gtaattgta caattcatgc tttattata attttttta taactatacc
181 aattgtaatt ggtggatttg gaaattgatt aattcctata ataataggat gtccagatat
241 atctttcca cgattaaata atattagatt ctgattatta ccaccctcat taataataat
301 aattgtaga tcataaata ataatggaac aggaacagga tgaactattt atccaccttt
361 atcaaataat attgctcata ataattttc agttgattta accatctttt ctcttcaact
421 agcaggattt tcataattt taggagcaat taattttatt tgtacaattc ttaataataat
481 accaaaacaat ataaaattaa atcaaatccc actatttcca tgatcaatct taattacage
541 tatattatta attttatctc taccagtctc agctgggtgct attactatat tattaactga
601 tcgaaattta aatacat.

***Brevicoryne brassicae* (Linnaeus, 1758) (Aphidoidea: Aphididae).** К семейству Капустные (Brassicaceae) принадлежит значительное количество овощных культур, распространенных главным образом во внутропических областях Северного полушария. Естественно исторически сложившийся ареал происхождения представителей семейства ограничен районами Средиземноморья, Кавказа и Средней Азии. Род *Brassica* L. (Brassicaceae) включает около 35 видов, из которых 16 возделываются с древних времен, многие из них являются сорно-полевыми растениями. Регионом естественного происхождения рода считается район Древнего Средиземноморья. На территорию Беларуси капуста была завезена греками, римлянами и русскими купцами из Западной Европы. Она принадлежит к числу важнейших овощных культур в стране, а некоторые ее сорта используются в декоративном садоводстве. В условиях Беларуси капусту, брюкву и другие растения рода *Brassica* и близких к ним представителей семейства Brassicaceae повреждает специализированный фитофаг – *Brevicoryne brassicae* (Linnaeus), включенный в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси [19].

B. brassicae в условиях Беларуси характеризуется голоциклическим однодомным биологическим циклом с зимовкой на стадии яйца. По трофической специализации принадлежит к числу монофагов, относящихся к хортобионтной фитобионтной группе. Это открытоживущий парехимососущий меристемофильный вид с выраженной способностью к тератогенности. Плотные колонии тлей формируются с обеих сторон листовых пластинок, побегах и соцветиях. Листья покрываются воскообразным налетом из экскрементов тлей. Насекомые изымают значительное количество пластических веществ из растений, листья обесцвечиваются, принимая слегка розоватую окраску, скручиваются и засыхают, побеги искривляются, семенники капусты становятся сиреневыми и не образуют семян. Выступает в качестве переносчика около 20 вирусных заболеваний крестоцветных растений [27].

Регионом происхождения капустной тли считается Средиземноморье. Вместе с кормовым растением *B. brassicae* широко распространилась по всей умеренной части мира (космополитный вид) [14; 28; 29]. Отмечается в Европе, Передней и Средней Азии, Северной Америке и Северной Африке, Австралии и Новой Зеландии [30]. На территории бывшего СССР встречается повсеместно, за исключением Крайнего Севера.

Таблица 9

Оценка представленности в BOLDSystems последовательностей гена COI *Brevicoryne brassicae* (Linnaeus, 1758)

Table 9

Assessment of COI gene sequence representation in BOLDSystems *Brevicoryne brassicae* (Linnaeus, 1758)

Семейство/вид	Количество последовательностей	Страна-коллектор
Aphididae / <i>B. brassicae</i>	25	Индия
	20	Пакистан
	9	США
	8	Германия
	16	Франция
	5	Новая Зеландия
	2	Греция
	2	Коста-Рика
	2	Канада
	2	Италия
	1	Иран
	1	Ирак
	4	Австралия
	3	Великобритания
	1	Южная Корея
1	Монголия	

***Cryptomyzus ribis* (Linnaeus, 1758) (Aphidoidea: Aphididae).** Род Смородина (*Ribes* L.) включает около 150 видов, распространенных в холодной и умеренной зоне Евразии и Северной Америки [24]. Традиционно возделываемыми в Беларуси плодово-ягодными культурами считаются красная (*Ribes rubrum* L.), черная (*Ribes nigrum* L.) и золотистая (*Ribes aureum* Pursh) смородина. Ее разводят главным образом как ягодные кустарники, однако она имеет и декоративное значение. Смородина пригодна для одиночных и групповых посадок, создания опушечных и живых изгородей. В условиях Беларуси *R. Rubrum*, ее садовые формы и сорта, а также *R. aureum* повреждаются единственным инвазивным видом тлей – *Cryptomyzus ribis* (Linnaeus), который включен в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси [18; 19].

C. ribis в условиях региона характеризуется голоциклическим факультативно двудомным биологическим циклом с зимовкой на стадии яйца. По трофической специализации принадлежит к числу монофагов, относящихся к тамнохортобионтной фитобионтной группе. Это филлобионтный вид с выраженной способностью к галлообразованию. Тли иницируют образование на листовых пластинках псевдогаллов от желтого до вишнево-красного цвета, в которых насекомые располагаются агрегированно; рост побегов прекращается, фотосинтетическая активность снижается до минимума. В питомниках снижается выход конечной продукции ягодников [31].

Регионом происхождения красногогалловой смородинной тли считается Северная Америка. Вместе с кормовым растением *C. ribis* распространился по территории Северной (Норвегия, Финляндия, Швеция), Юго-Восточной (Болгария, Босния и Герцеговина, Венгрия, Молдова, Румыния), Южной (Андорра, Испания, Италия), Западной (Бельгия, Великобритания, Ирландия, Северная Ирландия, Нидерланды, Франция) и Центральной (Беларусь, Германия, Дания, Литва, Латвия, Польша, Словакия, Словения, Украина, Чехия, Швейцария, Эстония) Европы, Европейской части России [20], проник в Ливан, Сербию и Черногорию [21], отмечен в Восточной Сибири, Китае, Японии [14].

Таблица 10

Оценка представленности в BOLDSystems последовательностей гена COI *Cryptomyzus ribis* (Linnaeus, 1758)

Table 10

Assessment of COI gene sequence representation in BOLDSystems *Cryptomyzus ribis* (Linnaeus, 1758)

Семейство/вид	Количество последовательностей	Страна-коллектор
Aphididae / <i>C. ribis</i>	14	Турция
	4	США
	4	Канада
	3	Германия
	2	Южная Африка
	2	Франция
	1	Китай
	1	Южная Корея
	1	Великобритания

***Aphis craccivora* Koch, 1854 (Aphidoidea: Aphididae).** С начала 50-х годов прошлого столетия широкое применение в зеленом строительстве получили представители рода *Caragana* Lam. (Fabaceae), которые использовались для создания живых изгородей вдоль авто- и железнодорожных магистралей, в озеленении городов, поселков городского типа, а также иных населенных пунктов. Естественно сложившиеся ареалы большинства представителей таксона простираются в Центральной Азии. В Беларуси в зеленых насаждениях широко представлена карагана древовидная (*Caragana arborescens* Lam.), интродуцированная с Юга Сибири. Помимо караган, в зеленых насаждениях широкое применение получили также представители рода *Robinia* L. – робиния обыкновенная, или белая акация (*Robinia pseudoacacia* L.), которая была интродуцирована в Европу из Северной Америки и в настоящее время успешно натурализовалась во многих регионах, войдя в число инвазивных видов. В Беларуси *R. pseudoacacia* присутствует в зеленых насаждениях повсеместно, кроме Северного региона интродукции древесных растений.

В условиях Беларуси караганы повреждают три вида настоящих тлей (*Therioaphis tenera* Aizenberg, *Acyrtosiphon caraganae* (Cholodkovsky), *Aphis craccivora* Koch), а робинию – 2 вида настоящих тлей (*Appendiseta robiniae* (Gillette) и *A. craccivora*). Люцерновая тля (*A. craccivora*) считается полифагом, повреждает преимущественно бобовые растения и включена в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси [18; 19].

A. craccivora характеризуется голоциклическим однодомным биологическим циклом с зимовкой на стадии яйца. В Беларуси, как и других регионах Евразии, для вида отмечена инверсия биологического цикла с «рокировкой» первичных и вторичных растений-хозяев [22]. По трофической специализации принадлежит к числу полифагов, относящихся к дендротамнохортобионтной фитобионтной группе. Это меристемофильный вид с выраженной способностью к деформации побегов и листовых пластинок. При массовом размножении тли продуцируют большое количество пади, которая выступает в качестве субстрата для развития сажистых грибов; побеги замедляют и прекращают рост. Выступает в качестве переносчика вирусных заболеваний растений.

Регионом происхождения люцерновой тли считается Северная Америка. Вместе с кормовым растением *A. craccivora* распространилась по всему миру (субкосмополитный вид), отсутствуя в приполярных регионах либо на отдельных островах [20; 26].

Таблица 11

Оценка представленности в BOLDSystems последовательностей гена *Aphis craccivora* Koch, 1854

Table 11

Assessment of COI gene sequence representation in BOLDSystems *Aphis craccivora* Koch, 1854

Семейство/вид	Количество последовательностей	Страна-коллектор
Aphididae / <i>A. craccivora</i>	172	Пакистан
	86	Кения
	67	Танзания
	49	США
	29	Канада
	26	Болгария
	11	Франция
	8	Греция
	4	Египет
	4	Аргентина
	4	Китай
	4	Австралия
	3	Бангладеш
	2	Турция
	2	Новая Зеландия
	2	Италия
	2	Индия
	1	Коста-Рика
1	Южная Африка	
1	Южная Корея	
2	Россия	

Расшифрована нуклеотидная последовательность гена COI тли *A. craccivora*, коллектированной на территории Беларуси:

```

1 tattggaat ttgatcagga ataattggat cttcacttag tattttaatt cgattagaat
61 taagacaaat taattcaatt attaataata atcaattata taatgtaatt gttacaattc
121 atgctttcat tataattttt ttataacta taccaattgt aattggagga ttggaaatt
181 gattaattcc cataataata ggftgtccag atatatcttt tccacgatta aataatatta
241 gattttgatt actaccacct tcattaataa taataatctg tagatttata attaataatg
301 gaacaggaac aggatgaact atttatccac ctttatcaaa caatattgct cataataaca
361 ttcagttga tttactatt ttctctctc atttagcagg tatttcatca attttaggag
421 caattaattt tatttgact attcctaata taataaccgaa taatataaaa ttaaatcaaa
481 ttccattatt cccctgatca atctaatta cagctatatt attaatftta tcattaccag
541 tattagctgg tgctattact atattattaa ctgatcgaaa tttaaataca tcatttttg
601 a.
    
```

Заключение

Оценена экологическая структура 10 чужеродных инвазивных видов тлей для территории Беларуси. Отмечено, что по трофической специализации большинство (*Brachycaudus (Acaudus) divaricatae* Shaposhnikov, 1956, *Panaphis juglandis* (Goeze, 1778), *Drepanosiphum platanoidis* (Schrank, 1801), *Phyllaphis fagi* (Linnaeus, 1767), *Hyadaphis tataricae* (Aizenberg, 1935), *Brevicoryne brassicae* (Linnaeus, 1758), *Cryptomyzus ribis* (Linnaeus, 1758)) принадлежит к числу высоко специализированных фитофагов, тогда как к неспециализированным и специализированным фитофагам относится 2 и 1 вид соответственно. Среди чужеродных инвазивных видов тлей преобладают филлобионты (*Pemphigus spyrothecae* Passerini, 1856, *P. juglandis*, *D. platanoidis*, *Ph. fagi*, *H. tataricae*, *C. ribis*), немного меньше отмечено меристемофильных форм – 4 вида (*A. craccivora*, *A. spiraeicola*, *B. divaricatae*, *B. brassicae*). Большинство адвентивных видов тлей (*D. platanoidis*, *Ph. fagi*, *P. juglandis*, *P. spyrothecae*) принадлежит к числу дендробионтов, тогда как дендрохортобионты (*B. divaricatae*), дендротамнобионты (*Aphis spiraeicola* Patch, 1914), тамнобионты (*H. tataricae*), хортобионты (*B. brassicae*), тамнохортобионты (*C. ribis*) и дендротамнохортобионты (*A. craccivora*) представлены единичными видами. Для большинства чужеродных инвазивных тлей (7 видов) характерен открытоживущий образ жизни, обитание в открытых галлах характерно для 2 видов, а 1 адвентивный вид инициирует формирование закрытых галлов. Среди инвазивных видов тлей рецентной фауны Беларуси у большинства (7 видов) отмечается способность к инициированию деформаций различных частей растений, а для 3 видов характерно формирование открытых и закрытых галлов.

На сегодняшний день нуклеотидные последовательности гена COI имеются для 10 чужеродных инвазивных видов тлей для территории Беларуси, среди которых *B. divaricatae*, *P. juglandis* и *D. platanoidis* уже расшифрованы и депонированы в BOLDSystems. В рамках настоящего исследования расшифрованы нуклеотидные последовательности гена COI 5 видов тлей рецентной фауны Беларуси из числа чужеродных инвазивных видов.

Библиографические ссылки

1. Чаховский АА, Шкутко НВ. *Декоративная дендрология Белоруссии*. Минск: Ураджай; 1979. 216 с.
2. Сидорович ЕА, Шкутко НВ, Чаховский АА. *Ассортимент деревьев и кустарников для зеленого строительства Белорусской ССР и рекомендации по выращиванию посадочного материала*. Минск: Наука и техника; 1982. 77 с.
3. Гаранович ИМ. *Декоративное садоводство*. Минск: Тэхналогія; 2005. 348 с.
4. Сидорович ЕА. *Ассортимент декоративных древесных и кустарниковых растений для зеленого строительства Беларуси*. Минск: НПК «Тэхналогія»; 1997. 61 с.
5. Воронцов АИ, Предтеченский ИН, Сазонова ГВ. *Защита городских насаждений от вредителей и болезней*. Москва: Министерство коммунального хозяйства РСФСР; 1963. 163 с.
6. Тимофеева ВА, Дишук НГ, Войнило НВ, Линник ЛИ. *Болезни и вредители декоративных растений в насаждениях Беларуси*. Минск: Беларуская наука; 2014. 185 с.
7. Семенченко В, Пугачевский А. Проблема чужеродных видов в фауне и флоре Беларуси. *Наука и инновации*. 2006;10(44):15–20.
8. Виноградова ЮК, Майоров СР, Хорун ЛВ. *Черная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах средней России*. Москва: ГЕОС; 2010. 512 с.
9. Эбель АЛ, и др. *Черная книга флоры Сибири*. Новосибирск: Гео; 2016. 439 с.
10. Бахмет ОН, редактор. *Инвазивные растения и животные Карелии*. Петрозаводск: ПИН Марков НА.; 2021. 223 с.
11. Heie OE. Aphidoidea (Hemiptera) of Fennoscandia and Denmark. II. The family Drepanosiphidae. Klapenborg: Scandinavian Science Press; 1982. 176 p.
12. Heie OE. Aphidoidea (Hemiptera) of Fennoscandia and Denmark. III. The family Aphididae: subfamily Pterocommatinae et tribe Aphidini of subfamily Aphidinae. Copenhagen; Leiden: E. J. Brill & Scandinavian Science Press; 1986. 314 p.
13. Heie OE. Aphidoidea (Hemiptera) of Fennoscandia and Denmark. IV. Family Aphididae: Part 1 of tribe Macroshipini of subfamily Aphidinae. Copenhagen; Leiden: E.J. Brill; 1991. 190 p.
14. Aphids on the World's Plants: An online identification and information guide [Internet, cited 2023 March 30]. London: Natural History Museum. Available from: <http://www.aphidsonworldsplants.info>.
15. Иванов АФ, Иванова ЕВ, Маргайлик ГИ, Нестерович НД, Пономарева АВ, Сироткина РГ, Смирнова ВА, Смольская ЕН, Чекалинская НИ. *Интродуцированные деревья и кустарники Белорусской ССР. Выпуск 3. Интродуцированные древесные растения флоры Сибири, Европы, Средиземноморья, Крыма, Кавказа и Средней Азии*. Минск: Изд-во АН БССР; 1961. 333 с.
16. Buga SV, Zhorov DG, Leshchinskaya NV, Stekolshchikov AV. Aphids of the family Eriosomatidae (Insecta: Homoptera) in Belarus. *Zoosystematica Rossica*. 2016;25(2):226–232. DOI: <https://doi.org/10.31610/zsr/2016.25.2.226>
17. Жоров ДГ. *Инвазивные виды гемиптероидных насекомых (Insecta: Hemipteroidea) Беларуси (таксономический состав, экологические группы, географическое распространение, биологические основы вредоносности)* [автореферат диссертации]. Минск: БГУ; 2017. 25 с.
18. Алехнович АВ, и др. *Черная книга инвазивных видов животных Беларуси*. Минск: Беларуская навука; 2016. 105 с.
19. Семенченко ВП, и др. *Черная книга инвазивных видов животных Беларуси*. Минск: Беларуская навука; 2020. 163 с.
20. Fauna Europaea [Internet, cited 2023 March 30]. Museum für Naturkunde Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung, version 2.6, 2013. Available from: <http://www.fauna-eu.org/>.
21. Holman J. *Host Plant Catalog of Aphids. Palaearctic Region*. Berlin: Springer; 2009. 1140 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8286-3>.

22. Жоров ДГ, Буга СВ. Адаптации биологических циклов чужеродных для фауны Беларуси видов тлей (Insecta: Sternorrhyncha: Aphidoidea). В: *IV Жученковские чтения международная научно-практическая конференция «Современные проблемы адаптации» (Белгород, 24–26 сентября 2018 г.)*. Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ»; 2018. с. 95–97.
23. Coeur D'Acier A, Pérez Hidalgo N, Petrović-Obradović O. Aphids (Hemiptera, Aphididae). Chapter 9.2. *BioRisk*. 2010; 4(1):435–474. DOI: 10.3897/biorisk.4.57.
24. Иванов АФ, Иванова ЕВ, Красник АИ, Мусиякина НФ, Нестерович НД, Пономарева АВ, Сироткина РГ, Смольская ЕН, Чекалинская НИ. *Интродуцированные деревья и кустарники Белорусской ССР. Выпуск 2. Интродуцированные древесные растения флоры Северной Америки*. Минск: Изд-во АН БССР; 1960. 295 с.
25. Emden VHF, Harrington R. Aphids as Crop Pest. Wallingford, UK, Cambridge, MA: CABI; 2007. 717 p.
26. Centre for Agriculture and Biosciences International (CABI) [Internet, cited 2023 March 30]. Available from: <http://www.cabi.org/>.
27. Сорока СВ, редактор. *Интегрированные системы защиты сельскохозяйственных культур от вредителей, болезней и сорняков. Рекомендации*. Минск: Белорусская наука; 2005. 463 с.
28. Raychaudhuri DN, editor. *Aphids of North-East India and Bhutan*. Calcutta: Zoological Society; 1980. 521 p.
29. Carvalho LM, de Bueno VHP, Martinez RP. Alate aphids survey on vegetable crops in Lavras (MG). *Cienc. Agrotecnol*. 2002;26(3): 523–532.
30. Pal M, Singh R. Biology and ecology of the cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae* (LINN.) (Homoptera: Aphididae): A review. *Journal of Aphidology*. 2013; 27:59–78.
31. Хотько ЭИ, Панкевич ТП, Молчанова РВ, Ярчаковская СИ. *Справочник вредителей плодовых и ягодных культур*. Минск: Белорусская энциклопедия; 2005. 260 с.

References

1. Chakhovskij AA, Shkutko NV. *Dekorativnaya dendrologiya Belorussii* [Ornamental dendrology in Belarus]. Minsk: Uradzhaj; 1979. 216 p. Russian.
2. Sidorovich EA, Shkutko NV, Chakhovskij AA. *Assortiment derev'ev i kustarnikov dlya zelenogo stroitel'stva Belorusskoj SSR i rekomendatsii po vyrashchivaniyu posadochnogo materiala* [Assortment of trees and shrubs for green construction in the Belarusian SSR and recommendations on the cultivation of planting material]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1982. 77 p. Russian.
3. Garanovich IM. *Dekorativnoe sadovodstvo* [Ornamental gardening]. Minsk: Tekhnologiya; 2005. 348 p. Russian.
4. Sidorovich EA. *Assortiment dekorativnykh drevesnykh i kustarnikovyx rastenij dlya zelenogo stroitel'stva Belarusi* [Assortment of ornamental woody and shrub plants for green building in Belarus]. Minsk: NPK «Tekhnologiya»; 1997. 61 p. Russian.
5. Voroncov AI, Predtechenskij IN, Sazonova GV. *Zashchita gorodskikh nasazhdenij ot vreditel'ej i boleznej* [Protecting urban plantations from pests and diseases]. Moscow: Ministerstvo kommunal'nogo hoziyaystva RSFSR; 1963. 163 p. Russian.
6. Timofeeva VA, Dishuk NG, Vojnilo NV, Linnik LI. *Bolezni i vrediteli dekorativnykh rastenij v nasazhdeniyakh Belarusi* [Diseases and pests of ornamental plants in plantations in Belarus]. Minsk: Belaruskaya nauka; 2014. 185 p. Russian.
7. Semenchenko V, Pugachevskij A. *Problema chuzherodnykh vidov v faune i flore Belarusi* [The problem of alien species in the fauna and flora of Belarus]. *Nauka i innovacii*. 2006;10(44):15–20. Russian.
8. Vinogradova YuK, Majorov SR, Horun LV. *Chernaya kniga flory Srednej Rossii: chuzherodnye vidy rastenij v ekosistemakh srednej Rossii* [Black Book of Flora of Central Russia: Alien Plant Species in the Ecosystems of Central Russia]. Moscow: GEOS; 2010. 512 p. Russian.
9. Ebel' AL, et al. *Chernaya kniga flory Sibiri* [The Black Book of Siberian Flora]. Novosibirsk: Geo; 2016. 439 p. Russian.
10. Bakhmet ON, editor. *Invazivnye rasteniya i zhivotnye Karelii* [Invasive plants and animals in Karelia]. Petrozavodsk: PIN Markov NA; 2021. 223 p. Russian.
11. Heie OE. Aphidoidea (Hemiptera) of Fennoscandia and Denmark. II. The family Drepanosiphidae. Klapenborg: Scandinavian Science Press; 1982. 176 p.
12. Heie OE. Aphidoidea (Hemiptera) of Fennoscandia and Denmark. III. The family Aphididae: subfamily Pterocommatinae et tribe Aphidini of subfamily Aphidinae. Copenhagen; Leiden: E. J. Brill & Scandinavian Science Press; 1986. 314 p.
13. Heie OE. Aphidoidea (Hemiptera) of Fennoscandia and Denmark. IV. Family Aphididae: Part 1 of tribe Macroshiphini of subfamily Aphidinae. Copenhagen; Leiden: E. J. Brill; 1991. 190 p.
14. Aphids on the World's Plants: An online identification and information guide [Internet, cited 2023 March 30]. London: Natural History Museum. Available from: <http://www.aphidsonworldsplants.info>.
15. Ivanov AF, Ivanova EV, Margajlik GI, Nesterovich ND, Ponomareva AV, Sirotkina RG, Smirnova VA, Smol'skaya EN, Chekalinskaya NI. *Introdutsirovannye derev'ya i kustarniki Belorusskoj SSR. Vypusk 3. Introdutsirovannye drevesnye rasteniya flory Sibiri, Evropy, Sredizemnomor'ya, Kryma, Kavkaza i Srednej Azii* [Introduced trees and shrubs of the Belarusian SSR. Issue 3. Introduced woody plants from the flora of Siberia, Europe, the Mediterranean, the Crimea, the Caucasus and Central Asia.]. Minsk: Izdatelstvo AN BSSR; 1961. 333 p. Russian.
16. Buga SV, Zhorov DG, Leshchinskaya NV, Stekolshchikov AV. Aphids of the family Eriosomatidae (Insecta: Homoptera) in Belarus. *Zoosystematica Rossica*. 2016;25(2):226–232. DOI: <https://doi.org/10.31610/zsr/2016.25.2.226>.
17. Zhorov DG. *Invazivnye vidy gemipteroidnykh nasekomyh (Insecta: Hemipteroidea) Belarusi (taksonomicheskij sostav, ekologicheskie gruppy, geograficheskoe rasprostranenie, biologicheskie osnovy vredonosnosti)* [Invasive species of hemipteroid insects (Insecta: Hemipteroidea) of Belarus (taxonomic structure, ecological groups, geographical distribution, biological basis of harmfulness)] [PhD thesis]. Minsk: BSU; 2017. 25 p. Russian.
18. Alekhnovich AV, et al. *Chernaya kniga invazivnykh vidov zhivotnykh Belarusi* [Black Book of Invasive Species in Belarus]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2016. 105 p. Russian.
19. Semenchenko VP, et al. *Chernaya kniga invazivnykh vidov zhivotnykh Belarusi* [Black Book of Invasive Species in Belarus]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2020. 163 s. Russian.
20. Fauna Europaea [Internet, cited 2023 March 30]. Museum für Naturkunde Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung, version 2.6, 2013. Available from: <http://www.fauna-eu.org/>.
21. Holman J. *Host Plant Catalog of Aphids. Palaearctic Region*. Berlin: Springer; 2009. 1140 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8286-3>.

22. Zhorov DG, Buga SV. Adaptatsii biologicheskikh tsiklov chuzherodnykh dlya fauny Belarusi vidov tlej (Insecta: Sternorrhyncha: Aphidoidea) [Adaptation of life cycles of alien species of aphids (Insecta: Sternorrhyncha: Aphidoidea) to the fauna of Belarus]. In: *IV Zhuchenkovskie chteniya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennye problemy adaptatsii» (Belgorod, 2018 September 24–26)*. Belgorod: ID «Belgorod» NIU «BelGU»; 2018. p. 95–97. Russian
23. Coeur D'Acier A, Pérez Hidalgo N, Petrović-Obradović O. Aphids (Hemiptera, Aphididae). Chapter 9.2. *BioRisk*. 2010; 4(1):435–474. DOI: 10.3897/biorisk.4.57.
24. Ivanov AF, Ivanova EV, Krasnik AI, Musiyakina NF, Nesterovich ND, Ponomareva AV, Sirotkina RG, Smol'skaya EN, Chekalinskaya NI. *Introdutsirovannye derev'ya i kustarniki Belorusskoj SSR. Vypusk 2. Introdutsirovannye drevesyne rasteniya flory Severnoj Ameriki* [Introduced trees and shrubs of the Belarusian SSR. Issue 2. Introduced woody plants of North American flora]. Minsk: Izdatelstvo AN BSSR; 1960. 295 p. Russian.
25. Emden VHF, Harrington R. *Aphids as Crop Pest*. Wallingford, UK, Cambridge, MA: CABI; 2007. 717 p.
26. Centre for Agriculture and Biosciences International (CABI) [Internet, cited 2023 March 30]. Available from: <http://www.cabi.org/>.
27. Soroka SV. (ed.). *Integrirovannye sistemy zashchity sel'skohozyajstvennykh kul'tur ot vreditel'ej, boleznej i sornyakov. Rekomendatsii* [Integrated crop protection systems against pests, diseases and weeds. Recommendations]. Minsk: Belorusskaya nauka; 2005. 463 s. Russian.
28. Raychaudhuri DN, editor. *Aphids of North-East India and Bhutan*. Calcutta: Zoological Society; 1980. 521 p.
29. Carvalho LM, de Bueno VHP, Martinez RP. Alate aphids survey on vegetable crops in Lavras (MG). *Cienc. Agrotecnol.* 2002;26(3): 523–532.
30. Pal M, Singh R. Biology and ecology of the cabbage aphid, *Brevicoryne brassicae* (LINN.) (Homoptera: Aphididae): A review. *Journal of Aphidology*. 2013;27:59–78.
31. Hot'ko EI, Pankevich TP, Molchanova RV, Yarchakovskaya SI. *Spravochnik vreditel'ej plodovyh i yagodnyh kul'tur* [Handbook of pests of fruit and berry crops]. Minsk: Belaruskaya encyklopedyya; 2005. 260 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 21.04.2023.
Received by editorial board 21.04.2023.

УДК 574.21

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УРБОЭКОСИСТЕМЫ Г. СЛУЦКА

Т. А. БОНИНА¹⁾, Ж. Э. МАЗЕЦ¹⁾, Н. С. ПРОХОЦКАЯ¹⁾

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

В исследовании приведены результаты комплексной оценки экологического состояния урбоэкосистемы г. Слуцка. Проведен анализ степени рекреационной нарушенности и степени устойчивости зеленых насаждений в условиях городской среды с разным уровнем антропогенной нагрузки: в пригородной зоне (контроль), центральной зоне Парка культуры и отдыха и на территории с высокой антропогенной нагрузкой среды, который находится вблизи промышленных предприятий г. Слуцка. Установлена низкая степень рекреационной нарушенности в контроле и в парковой зоне, тогда как в зоне промышленных предприятий состояние окружающей среды оценивается как угрожающее. Выявлена видоспецифическая реакция морфометрических изменений листовых пластинок *Betula pendula* Roth и *Tilia cordata* Mill. при использовании метода флуктуирующей асимметрии, отражающая особенности экологического состояния отдельных компонентов урбоэкоистемы. Отмечено, что древостой Парка культуры и отдыха находится в удовлетворительном состоянии и функционален как санитарно-защитная зона в условиях городской среды. Однако на участке, расположенном вблизи промышленных предприятий, состояние биоиндикаторов оценивается как критическое и позволяет предположить, что в данном районе достаточно высокий уровень загрязнения среды вредными веществами. В ходе детального изучения видоспецифических отличий морфометрических показателей *Betula pendula* и *Tilia cordata* выявлено, что наиболее варибельным показателем оказался угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка. Именно здесь отмечаются четкие специфические различия между *Betula pendula* и *Tilia cordata*. Так, по этому показателю у *Betula pendula* установлен средний уровень в контроле и повышенный в условиях парка и промышленной зоны (до IV уровня), тогда как у *Tilia cordata* в контроле выявлен самый низкий уровень, а при повышении антропогенной нагрузки достигал критических значений и максимума в промышленной зоне. Следовательно, целесообразна разработка относительного интегрального показателя флуктуирующей асимметрии в сравнении с контролем для определенного вида растений. Таким образом, можно рассматривать *Tilia cordata* как эффективный биоиндикатор состояния урбоэкоистем. Полученные результаты позволяют рекомендовать экологическим службам г. Слуцка пересмотреть подходы к озеленению территории вокруг промышленных предприятий с учетом нарастающей антропогенной нагрузки.

Ключевые слова: *Betula pendula* Roth; *Tilia cordata* Mill.; флуктуирующая асимметрия; степень деградации насаждений.

Образец цитирования:

Бонина ТА, Мазец ЖЭ, Прохочкая НС. Комплексная оценка экологического состояния урбоэкоистемы г. Слуцка. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2023;2:40–47.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-40-47>

For citation:

Bonina TA, Mazets ZhE, Prakhotskaya NS. Comprehensive assessment of the urban ecosystem ecological state of the city of Slutsk. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2023;2:40–47. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-40-47>

Авторы:

Татьяна Александровна Бонина – кандидат химических наук, доцент; доцент кафедры общей биологии и ботаники.
Жанна Эмануиловна Мазец – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры общей биологии и ботаники.
Надежда Сергеевна Прохочкая – студентка факультета естествознания.

Authors:

Tatsiana A. Bonina, PhD (chemistry), docent; associate professor at the department of general biology and botany.
tatbonina@gmail.com
Zhanna E. Mazets, PhD (biology), docent; associate professor at the department of general biology and botany.
zhannamazets@mail.ru
Nadezhda S. Prakhotskaya, student at the faculty of natural science.
nadyaprophotskaya@mail.ru

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE URBAN ECOSYSTEM ECOLOGICAL STATE OF THE CITY OF SLUTSK

T. A. BONINA^a, Zh. E. MAZETS^a, N. S. PRAKHOTSKAYA^a

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

Corresponding author: T. A. Bonina (tatbonina@gmail.com)

The results of a comprehensive assessment of the Slutsk urban ecosystem ecological state have been discussed in the article. The analysis of the recreational disturbance degree and the grade of green planting's resistance in the urban environment with different levels of anthropogenic load was carried out: in the suburban area (control), the central zone of the Park of Culture and Recreation and in the territory with a high anthropogenic load of the environment, which is located near industrial enterprises of Slutsk city. A low degree of recreational disturbance has been established in the control and in the park zone, while in the zone of industrial enterprises the state of the environment was assessed as threatening. A species-specific reaction of morphometric changes in the leaf blades of *Betula pendula* Roth and *Tilia cordata* Mill. has been revealed using the fluctuating asymmetry method, which reflects the features of the individual components ecological state of the urban ecosystem. It was noted that the tree stand of the Park of Culture and Leisure is in a satisfactory condition and is functional as a sanitary protection zone in an urban environment. However, at the site located near industrial enterprises, the state of bioindicators is assessed as critical and suggests that in this area there is a rather high level of environmental pollution with harmful substances. In the course of a detailed study of species-specific differences in the morphometric parameters of *Betula pendula* and *Tilia cordata*, it has been revealed that the most variable indicator was the angle between the main vein and the second-order vein from the base of the leaf. It is here that there are clear specific differences between *Betula pendula* and *Tilia cordata*. Thus according to this indicator *Betula pendula* had an average level in the control and increased in the conditions of the park and the industrial zone (up to level IV), while *Tilia cordata* had the lowest level in the control, and with an increase in anthropogenic load it reached critical values and a maximum was in the industrial zone. It is noted that it is expedient to develop a relative integral indicator of fluctuating asymmetry in comparison with the control for a certain plant species. Thus, *Tilia cordata* can be considered as an effective bioindicator of the urban ecosystems' state. The obtained results make it possible to recommend the environmental services of the Slutsk city to reconsider approaches to greening the area around industrial enterprises, considering the growing anthropogenic load.

Keywords: *Betula pendula* Roth; *Tilia cordata* Mill.; fluctuating asymmetry; degree of plantation degradation.

Введение

Процесс урбанизации в настоящее время связан с рядом экологических проблем и необходимостью объективной оценки состояния городской среды для обеспечения качества жизни и безопасности жизнедеятельности человека. Любая урбанизированная территория характеризуется повышенной антропогенной нагрузкой на окружающую среду. При этом развитие инфраструктуры города закономерно сопровождается ростом загрязнения атмосферного воздуха и почвы вредными для здоровья человека веществами. Обязательным элементом градостроительства являются садово-парковые территории, которые выполняют функцию санитарно-защитных зон и формируют «экологический каркас» в условиях городской среды. Зеленые насаждения не только создают привлекательный ландшафт жилых районов, но и улучшают состояние атмосферного воздуха, способствуют снижению шума, гармонизируют жизнь горожан [1]. В связи с этим важное значение имеет проведение постоянного мониторинга экологического состояния этих территорий для обеспечения поддержания возложенных на них функций и задач в условиях нарастающих антропогенных нагрузок.

Следует отметить, что данный вопрос достаточно хорошо освещен в научной литературе. Предметом изучения, как правило, являются особенности экологического состояния рекреационных зон крупных городов [2–8]. Результаты подобных исследований являются индивидуальными и специфичны для конкретных урбоэкосистем. Городская среда динамична и микроклимат отдельно взятой территории формируется под воздействием комплекса абиотических и биотических факторов, имеющих индивидуальные особенности, связанные с уникальностью конкретной инфраструктуры в масштабах города.

Наиболее неблагоприятное состояние зеленых насаждений фиксируется вблизи магистралей и действующих промышленных предприятий, что обусловлено, как правило, выбросами в окружающую среду вредных веществ в результате деятельности предприятий, а также использованием противогололедных реагентов. При этом происходит снижение адаптационных способностей растений, нарушение их развития и, как следствие, изменяется морфология листовых пластинок [7; 8].

Поэтому проведение мониторинговых исследований парков и скверов, состояния зеленых насаждений рядом с промышленными предприятиями с целью минимизации негативных воздействий является актуальной проблемой, в том числе и в рекреационных зонах небольших городов.

В настоящее время, наряду с физическими и химическими методами оценки качества среды, используются методы биоиндикации. Они позволяют выявить степень антропогенной нагрузки на популяционном и организменном уровнях по ответной реакции живых организмов, в частности по изменениям морфологии различных видов растений и отдельных органов. По литературным данным, достаточно информативным и достоверным показателем ситуации в городской среде является состояние листьев древесных растений. Установлено, что характер морфометрических изменений многолетних насаждений коррелирует с химической природой загрязняющего вещества на исследуемой территории. Игнорирование данного процесса может привести к утрате или снижению эффективности рекреационных и средообразующих функций зеленых насаждений городской среды [9–11].

Цель исследования – комплексная оценка состояния древесных насаждений как биоиндикаторов окружающей среды г. Слуцка. В настоящее время на территории города находится несколько крупных заводов, комбинатов и фабрик. Доминирующим фактором загрязнения является интенсивно растущая автотранспортная нагрузка и расширение автомобильных магистралей.

В центре города расположен Парк культуры и отдыха, представляющий крупную озелененную территорию, основным функциональным назначением которой является рекреация и отдых. Но вместе с тем зеленые насаждения на территории парка, прежде всего лиственные деревья, имеют важную экологическую значимость и являются ядром «зеленого каркаса», выполняющего функцию санитарно-защитной зоны градостроительной инфраструктуры.

Материалы и методы исследования

Сбор материала и полевые исследования проводились с июля по август 2022 г. в урбозкосистемах г. Слуцка и пригородной зоны с разным уровнем антропогенного воздействия. В качестве контроля был выбран участок № 1 с низкой антропогенной нагрузкой среды, расположенный в пригородной зоне в д. Новодворцы, которая находится в 3 км от г. Слуцка. Участок № 2 расположен в центральной зоне Парка культуры и отдыха и участок № 3 («промзона» – зеленые насаждения на территории с высокой антропогенной нагрузкой среды), который находится вблизи предприятий: ОАО «Слуцкий сыродельный комбинат», РУП «Слуцкие пояса» и ОАО «Слуцкий сахарорафинадный комбинат» (рис. 1).



Рис. 1. Точки сбора материала: а – с низкой антропогенной нагрузкой (№ 1), б – парковая зона (№ 2), в – «промзона» (№ 3)

Fig. 1. Points of material collection: a – with low anthropogenic load (№ 1), b – park area (№ 2), c – «industrial zone» (№ 3)

При анализе степени деградации древостоя исследуемых участков использовали метод В. А. Алексеева [12]. Оценку жизненного состояния деревьев проводили на пробных площадках, размер которых составил 0,5 га. При этом в парковой зоне было проанализировано три площадки, а на участке № 3 площадка охватила всю доступную территорию с древостоем.

Древесным растениям в зависимости от общего состояния морфо-анатомических параметров присваивали определенный балл: здоровые – 0,9–1,0 балл; поврежденные – 0,7–0,89; сильно поврежденные – 0,4–0,69; отмирающие – 0,1–0,39; сухостой – 0–0,09. При этом учитывалось наличие или отсутствие отклонений в строении ствола, кроны, ветвей и побегов, доля сухих ветвей в кроне, целостность и состояние коры, а также пораженность деревьев вредителями и другими негативными природными и антропогенными факторами среды.

Расчет индекса состояния (жизненности) древостоя осуществляли по формуле:

$$I_n = \frac{n_1 + 0,7n_2 + 0,4n_3 + 0,1n_4}{n}, \quad (1)$$

где n_1, n_2, n_3, n_4 – число здоровых, поврежденных, сильно поврежденных, отмирающих деревьев соответственно; n – общее число деревьев (включая сухостой) [12].

Оценку состояния окружающей среды проводили по вариации флуктуирующей асимметрии (ФА) листовых пластинок *Betula pendula* Roth и *Tilia cordata* Mill. Согласно научным данным, показатель ФА чувствителен к степени загрязнения вредными веществами среды обитания организма [13].

Исследования проводили в период полной сформированности листовых пластинок в конце вегетационного сезона. Сбор биологического материала проводили согласно методическим рекомендациям В. М. Захарова [13]. Листья собирали с деревьев, находящихся в средневозрастном онтогенетическом состоянии, в пределах нижней части кроны вокруг дерева на уровне поднятой руки с укороченных побегов. Из каждой зоны было взято равномерно с 4–5 деревьев по 20–25 листьев. С каждой точки сбора в итоге было собрано по 100 листьев *Betula pendula* и *Tilia cordata*. Уровень стабильности развития растений оценивался по величине флуктуирующей асимметрии пяти признаков листа, характеризующих стабильность формообразования листовой пластинки в онтогенезе: 1 – ширина левой и правой половинок листа (от границы центральной жилки до края листа); 2 – длина жилки второго порядка, второй от основания листа; 3 – расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; 4 – расстояние между концами этих же жилок; 5 – угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка [13].

Все измерения проводились в миллиметрах [14]. Величина ФА определялась по формуле:

$$\text{ФА ср.} = \frac{1}{m \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{(L_{ij} - R_{ij})}{(L_{ij} + R_{ij})}, \quad (2)$$

где L_{ij} и R_{ij} – значение j -го признака у i -го листа соответственно слева и справа от плоскости симметрии. При этом $m = 5$ (число признаков), а $n = 100$ (количество листовых пластинок).

Для оценки качества среды использовалась пятибалльная шкала степени нарушения стабильности развития, разработанная В. М. Захаровым для *Betula pendula* [13].

Оценку амплитуды изменчивости изучаемых морфометрических признаков для каждой из сторон листовой пластинки определяли по коэффициенту вариации (C), выраженную в % [15; 16]:

$$C = \sigma * 100 / M_{\text{ср}}, \quad (3)$$

где σ – среднее квадратичное отклонение, а $M_{\text{ср}}$ – среднее значение по данному признаку.

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы *Microsoft Excel*.

Результаты исследования и их обсуждение

С целью первичной комплексной оценки экологического состояния Парка культуры и отдыха г. Слуцка как основной ландшафтно-рекреационной зоны города и озелененной территории общего пользования был осуществлен анализ степени рекреационной нарушенности на основе следующих параметров: степень вытоптанности напочвенного покрова (доля площади с обнаженной почвой или грунтом, %); количество пней спиленных и срубленных деревьев (шт./га); поврежденность древесной растительности (% поврежденных деревьев от их общего количества); оценка степени деградации древесных видов растений [17; 18].

В ходе исследования было выявлено, что степень вытоптанности напочвенного покрова составила 3 %. При этом было зафиксировано отсутствие спиленных и срубленных деревьев и слабо выраженная дорожно-тропиночная сеть.

Коэффициент степени деградации зеленых насаждений на территории парка (участок № 2), по В. А. Алексееву, составил 0,9. При этом в пригородной зоне в д. Новодворцы (участок № 1) с низкой антропогенной нагрузкой среды коэффициент составил 1,0 балл, а в «промзоне» (участок № 3) – 0,54 балла. Полученные результаты позволяют сделать вывод о низкой степени рекреационной нарушенности в контроле и урбозкосистеме парковой зоны, поскольку полученные коэффициенты соответствует здоровому жизненному состоянию древостоя, тогда как в зоне промышленных предприятий состояние окружающей среды оценивается как угрожающее. Следует отметить, что в структуре парка отсутствуют традиционные зоны аттракционов, спортивных площадок и другие территории для активного отдыха, что возможно и объясняет низкую рекреационную нагрузку.

На втором этапе исследования нами был проведен более детальный анализ экологического состояния и степени устойчивости зеленых насаждений исследуемых участков к вредным веществам антропогенного происхождения в условиях городской среды.

Уровень загрязнения среды устанавливали с помощью интегрального показателя величины флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* и *Tilia cordata*. По результатам исследования было выяснено, что ФА листовых пластинок *Betula pendula* и *Tilia cordata* на участке № 1 соответствует условно нормальному качеству среды (рис. 2 и 3) и позволяет сделать вывод о минимальной антропогенной нагрузке на контрольном участке. Сопоставимые значение с незначительным повышением интегральных показателей были получены для участка № 2 в центральной зоне парка. Следовательно,

древостой Парка культуры и отдыха находится в удовлетворительном состоянии и функционален как санитарно-защитная зона в условиях городской среды.

Наиболее высокие показатели ФА древесных насаждений наблюдались на участке № 3, расположенном вблизи промышленных предприятий. Состояние биоиндикаторов оценивается как критическое и позволяет предположить, что в данном районе достаточно высокий уровень загрязнения среды вредными веществами.

Следует отметить, что интегральный показатель флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Tilia cordata* во всех точках сбора был ниже, чем у *Betula pendula* (рис. 2, 3) и, согласно шкале В. М. Захарова, разработанной для *Betula pendula*, на участке № 3 обсуждаемый параметр у *Tilia cordata* соответствует среднему уровню. В связи с этим был определен относительный видоспецифичный уровень превышения показателей на исследуемых участках по сравнению с контрольным.

Таким образом, в точках № 2 и 3 процент превышения ФА относительно контрольных показателей у *Betula pendula* составил 10 и 75 % соответственно, тогда как у *Tilia cordata* этот процент был заметно выше – 42,9 и 114,3 %. Наиболее высокая степень отклонения ФА в сравнении с контрольным участком была выявлена у *Tilia cordata*, что согласуется с научными данными, исходя из которых *Tilia cordata* является наиболее чувствительным фитоиндикатором по отношению к загрязнению тяжелыми металлами городской среды [16].

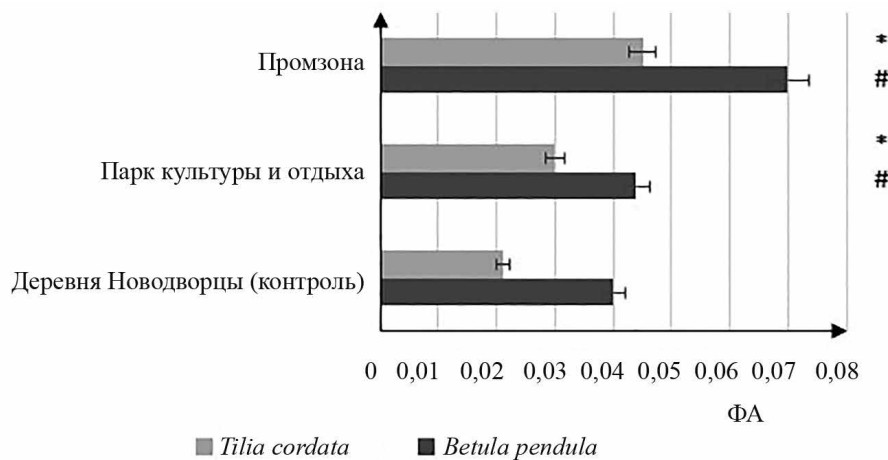


Рис. 2. Интегральный показатель флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* Roth и *Tilia cordata* Mill. в точках сбора

Примечание. * Достоверно при $p \leq 0,05$ по сравнению с контролем *Tilia cordata* Mill.; # достоверно при $p \leq 0,05$ по сравнению с контролем *Betula pendula* Roth

Fig. 2. Integral indicator of fluctuating asymmetry of leaf blades of *Betula pendula* and *Tilia cordata* Mill. at collection points

Note. * Significant at $p \leq 0.05$ compared to *Tilia cordata* Mill. control; # significant at $p \leq 0.05$ compared to control *Betula pendula* Roth

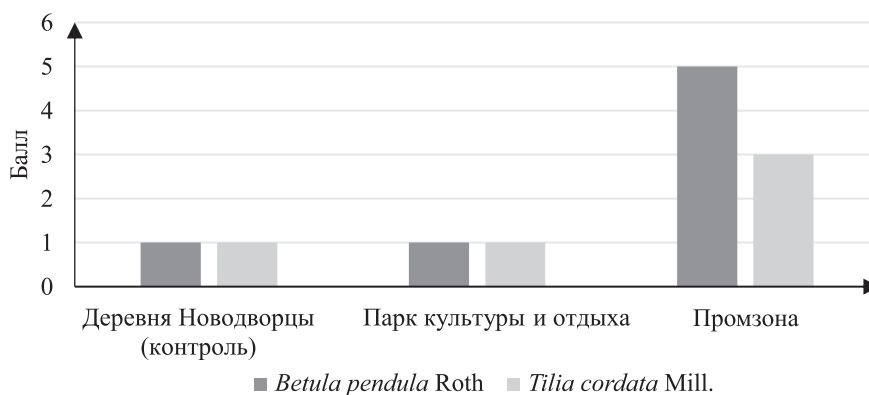


Рис. 3. Варьирование интегрального показателя флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* и *Tilia cordata* в точках сбора по балльной шкале

Fig. 3. Variation of the integral index of the fluctuating asymmetry of leaf blades of *Betula pendula* and *Tilia cordata* at collection points on a point scale

Полученные результаты указывают на необходимость учета видовой специфичности листовых пластинок при использовании метода флуктуирующей асимметрии и применения 5-балльной шкалы, разработанной изначально для *Betula pendula*. Следует отметить, что целесообразна разработка относительного интегрального показателя в сравнении с контролем для определенного вида растений. Подтверждение предварительных выводов и внесение конкретных корректировок в апробированную методику требует дополнительных исследований.

Для более детального изучения видоспецифических отличий морфометрических показателей *Betula pendula* и *Tilia cordata* был проведен сравнительный анализ на основе определения коэффициента вариации для каждого из 5 измеряемых признаков листовых пластинок (табл. 1, 2). В ходе анализа выявлено, что наиболее вариабельным показателем оказался угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка, что соответствует 5 параметру. Однако здесь отмечаются четкие специфические различия между *Betula pendula* и *Tilia cordata*. Так, у *Betula pendula* установлен средний уровень (табл. 1) в контроле и повышенный в условиях парка и промзоны (до IV уровня), тогда как у *Tilia cordata* в контроле отмечен самый низкий уровень, а при повышении антропогенной нагрузки достигал критических значений и максимума в промзоне.

Таблица 1

Коэффициент вариации признаков листа *Betula pendula* Roth в точках сбора

Table 1

Coefficient of variation of *Betula pendula* Roth leaf traits at collection points

Метрические признаки листа	Точки сбора	1		2		3		4		5	
		л	п	л	п	л	п	л	п	л	п
Коэффициент вариации, %	1	1,67	1,98	2,75	5,75	5,63	6,28	1,64	1,79	21,75	26,98
	2	1,69	1,87	2,59	5,55	6,58	7,75	1,87	2,04	30,1	32,75
	3	4,08	3,805	4,28	5,25	4,51	4,02	7,49	9,39	28,58	27,03
Уровень изменчивости, балл	1	I	I	I	I	I	I	I	I	III	III
	2	I	I	I	I	I	II	I	I	IV	IV
	3	I	I	I	I	I	I	II	II	IV	IV

Таблица 2

Коэффициент вариации признаков листа *Tilia cordata* Mill. в точках сбора

Table 2

Coefficient of variation of *Tilia cordata* Mill. leaf traits at collection points

Метрические признаки листа	Точки сбора	1		2		3		4		5	
		л	п	л	п	л	п	л	п	л	п
Коэффициент вариации, %	1	2,88	2,12	5,21	5,19	0,04	0,04	8,69	8,81	6,35	6,97
	2	8,8	8,94	3,57	3,67	9,8	9,9	10,42	11,9	39,03	43,22
	3	17,05	15,36	6,99	7,86	9,5	9,3	12,64	14,6	56,96	55,41
Уровень изменчивости, балл	1	I	I	I	I	I	I	II	II	I	I
	2	II	II	I	I	II	II	II	II	V	V
	3	III	II	I	II	II	II	II	II	VI	VI

Таким образом, можно рассматривать *Tilia cordata* как эффективный биоиндикатор. При этом наиболее чувствительным параметром выступает величина угла между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка. Формирование данного морфометрического показателя во многом связано с гистогенезом и работой прокамбия. Образовательные ткани часто подвергаются негативному действию среды, что приводит к асинхронной дифференцировке прокамбия в проводящие ткани [16].

Заключение

В результате комплексных исследований на основе анализа ряда показателей проведена оценка состояния зеленых насаждений Парка культуры и отдыха как важного элемента природно-рекреационного каркаса урбоэкосистемы г. Слуцка. Установлено удовлетворительное состояние древесного яруса парковой зоны, обеспечивающего поддержание экологического баланса в городской среде.

На основе измерения интегрального показателя флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* и *Tilia cordata* в районе промышленных предприятий (ОАО «Слуцкий сыродельный комбинат», РУП «Слуцкие пояса» и ОАО «Слуцкий сахарорафинадный комбинат»), расположенных на улицах Тутаринова и Головащенко, качество среды оценивается как критическое. Полученные результаты позволяют рекомендовать экологическим службам города пересмотреть подходы к озеленению данной урбанизированной территории с учетом нарастающей антропогенной нагрузки.

Сравнительный анализ эффективности оценки уровня загрязнения среды методом флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* и *Tilia cordata* выявил различия по интегральным показателям и, соответственно, необходимость учета видоспецифичности биоиндикатора и относительного показателя в сравнении с контролем. Установлено, что наиболее чувствительным параметром выступает величина угла между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка (на данный показатель необходимо обращать особое внимание). Таким образом, полученные данные требуют дальнейшего исследования, а методика В. М. Захарова нуждается в корректировке с учетом видовых особенностей формирования листовых пластинок древесных растений.

Библиографические ссылки

1. Неверова ОА, Колмогорова ЕЮ. *Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты*. Новосибирск: Наука; 2003. 222 с.
2. Сидоренко МВ, Юнина ВП, Ерофеева ЕА. Оценка экологического состояния рекреационных зон г. Нижнего Новгорода по уровням загрязнения почв тяжелыми металлами и биоиндикационным показателям листьев *Betula pendula* Roth. *Самарский научный вестник*. 2020;9(1):88–92.
3. Дорофеева ТБ. Анализ состояния городских насаждений в Пушкинском районе Санкт-Петербурга. *Биосфера*. 2012;4(2):158–166.
4. Бонина ТА, Маврищев ВВ, Аршан МВ. Многокомпонентная биоиндикация рекреационных зон г. Минска с повышенной антропогенной нагрузкой. *Вести БГПУ. Серия 3. Физика. Математика. Информатика. Биология. География*. 2019;1:5–9.
5. Кулагин АЮ. *Устойчивость и адаптация древесных растений: антропогенная трансформация окружающей среды и вопросы ликвидации накопленного экологического ущерба*. В: *Живые системы*. Саратов: Амирит, 2019. с. 144–146.
6. Гудзенко ЕО. Оценка экологического состояния зеленых насаждений города Ростова-на-Дону [автореферат диссертации]. Ростов-на-Дону: [б. и.]; 2016. 23 с.
7. Неверова ОА. *Опыт мониторинга городских древесных насаждений (на примере г. Кемерово)*. В: *Урбоэкосистемы проблемы и перспективы развития. Материалы международной научно-практической конференции*. Ишим: ИГПИ; 2008. с. 125–127.
8. Видякина АА, Семенова МВ. Влияние загрязнения воздуха на состояние древесных растений г. Тюмени. *Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения*. 2012;12:49–53.
9. Gorelova SV, Frontasyeva MV, Gorbunov AV. Bioindication and monitoring of atmospheric deposition using trees and shrubs. Materials of 27th Task Force Meeting of the UNECE ICP Vegetation. Paris: [publisher unknown]; 2014. p. 63.
10. Gillooly SE, Carr Shmool JL, Michanowicz DR. Framework for using deciduous tree leaves as biomonitors for intraurban particulate air pollution in exposure assessment. *Environ Monitoring Assessment*. 2016;7:456–479.
11. Уфимцева МД. Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биогеохимических провинциях. *Геохимия*. 2015;5:450–465.
12. Алексеев ВА. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев. *Некоторые вопросы диагностики и классификации поврежденных загрязнением лесных экосистем*. В: *Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение*. Ленинград: Наука; 1990. с. 38–53.
13. Захаров ВМ. *Здоровье среды: методика оценки*. Москва: Центр экологической политики России; 2000. 66 с.
14. Клевцова МА, Фан Тхи Лан Ань. Биоиндикация экологического состояния урбанизированных территорий. *Вестник ВГУ. География. Геоэкология*. 2016;3:79–86.
15. Мамаев СА. *Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале)*. Москва: Наука; 1972. 284 с.
16. Зыков ИЕ, Федорова ЛВ, Баранов СГ. Оценка биоиндикационного значения уровня изменчивости параметров листовых пластинок липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях города Орехово-Зуево и Орехово-Зуевского района. *Вестник МГОУ. Естественные науки*. 2015;1:15–21.
17. Ермакова АА. Проблемы определения рекреационных нагрузок и рекреационной емкости территорий. *Вестник ВГУ. География. Геоэкология*. 2009;2:16–20.
18. Исаченко ТЕ, Исаченко ГА, Озерова СД. Оценка рекреационной нарушенности и регулирование нагрузок на особо охраняемых природных территориях Санкт-Петербурга. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2020;65(1):16–32.

References

1. Neverova OA, Kolmogorova YeYU. *Drevesnyye rasteniya i urbanizirovannaya sreda: ekologicheskiye i biotekhnologicheskiye aspekty* [Woody Plants and the Urban Environment. Ecological and Biotechnological Aspects]. Novosibirsk: Nauka; 2003. 222 s. Russian.
2. Sidorenko MV, Yunina VP, Yerofeyeva YeA. *Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya rekreatsionnykh zon g. Nizhnego Novgoroda po urovnyam zagryazneniya pochv tyazhelyimi metallami i bioindikatsionnym pokazatelyam list'yev Betula pendula Roth* [Assessment of the ecological state of the recreational areas of Nizhny Novgorod according to the levels of soil pollution with heavy metals and bioindicative parameters of the leaves of *Betula pendula* Roth.]. *Samarskiy nauchnyy vestnik*. 2020;9(1):88–92. Russian.
3. Dorofeyeva TB. *Analiz sostoyaniya gorodskikh nasazhdeniy v Pushkinskom rayone Sankt-Peterburga* [Analysis of the state of urban plantings in the Pushkinsky district of St. Petersburg]. *Biosphere*. 2012;4(2):158–166. Russian.
4. Bonina TA, Mavrishchev VV, Arshan MV. *Mnogokomponentnaya bioindikatsiya rekreatsionnykh zon g. Minska s povyshennoy antropogennoy nagruzkoj* [Multicomponent bioindication of recreational areas of Minsk with increased anthropogenic load]. *Vesti BGPU. Seriya 3. Fizika. Matematika. Informatika. Biologiya. Geografiya*. 2019;1:5–9. Russian.
5. Kulagin AY. *Ustoychivost' i adaptatsiya drevesnykh rasteniy: antropogennaya transformatsiya okruzhayushchey sredy i voprosy likvidatsii nakoplennoy ekologicheskogo ushcherba* [Stability and adaptation of woody plants: anthropogenic transformation of the environment and the elimination of accumulated environmental damage]. Saratov: Amirit, 2019. p. 144–146. Russian.
6. Gudzenko YO. *Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya zelenykh nasazhdeniy goroda Rostova-na-Donu* [Assessment of the ecological state of green spaces in the city of Rostov-on-Don [PhD thesis]. Rostov-na-Donu: [publisher unknown]; 2016. 23 p. Russian.
7. Neverova OA. *Opyt monitoringa gorodskikh drevesnykh nasazhdeniy (na primere g. Kemerovo)* [Experience in monitoring urban tree plantations (on the example of the city of Kemerovo)]. In: *Urban ecosystems problems and development prospects: Proceedings of the international scientific-practical conference*. Ishim: IGPI; 2008. S. 125–127. Russian.
8. Vidyakina AA, Semenova MV. *Vliyaniye zagryazneniya vozdukha na sostoyaniye drevesnykh rasteniy g. Tyumeni* [Influence of air pollution on the state of woody plants in the city of Tyumen]. *Bulletin of ecology, forest science and landscape science*. 2012;12:49–53. Russian.
9. Gorelova SV, Frontasyeva MV, Gorbunov AV. *Influence of air pollution on the state of woody plants in the city of Tyumen*. *Bulletin of ecology, forest science and landscape science*. Paris: [publisher unknown]; 2014. p. 63.
10. Gillooly SE, Carr Shmool JL, Michanowicz DR. *Framework for using deciduous tree leaves as biomonitors for intraurban particulate air pollution in exposure assessment*. *Environ Monitoring Assessment*. 2016;7:456–479.
11. Ufimtseva MD. *Patterns of accumulation of chemical elements by higher plants and their reactions in anomalous biogeochemical provinces*. *Geokhimiya* [Geochemistry]. 2015;5:450–465. Russian.
12. Alekseyev VA. *Diagnostika zhiznennogo sostoyaniya derev'yev i drevostoyev. Nekotoryye voprosy diagnostiki i klassifikatsii povrezhdennykh zagryazneniyem lesnykh ekosistem*. In: *Lesnyye ekosistemy i atmosferye zagryazneniye*. [Diagnostics of the vital state of trees and forest stands. Some issues of diagnostics and classification of forest ecosystems damaged by pollution. In: *Forest Ecosystems and Air Pollution*]. Leningrad: Nauka; 1990. p. 38–53. Russian.
13. Zakharov VM. *Zdorov'ye sredy: metodika otsenki* [Health of the environment: assessment methodology]. Moscow: Center for Environmental Policy of Russia; 2000. 66 p. Russian.
14. Klevtsova MA, Fan Tkhi Lan An. *Bioindikatsiya ekologicheskogo sostoyaniya urbanizirovannykh territoriy* [Bioindication of the ecological state of urbanized territories]. *Bulletin of VSU. Geography. Geoecology*. 2016;3:79–86. Russian.
15. Mamayev SA. *Formy vnurividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy (na primere semeystva Pinaceae na Urale)* [Forms of intraspecific variability of woody plants (on the example of the Pinaceae family in the Urals)]. Moscow: Science; 1972. 284 p. Russian.
16. Zykov IY, Fedorova LV, Baranov SG. *Otsenka bioindikatsionnogo znacheniya urovnya izmenchivosti parametrov listovykh plastinok lipy melkolistnoy (Tilia cordata Mill.) v usloviyakh goroda Orekhovo-Zuyevo i Orekhovo-Zuyevskogo rayona* [Evaluation of the bioindicative value of the level of variability of the parameters of leaf blades of small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) in the conditions of the city of Orekhovo-Zuyevo and the Orekhovo-Zuyevsky district]. *Vestnik MGOU. Natural Sciences*. 2015; 1:15–21. Russian.
17. Yermakova AA. *Problemy opredeleniya rekreatsionnykh nagruzok i rekreatsionnoy yemkosti territoriy* [Problems of determining recreational loads and recreational capacity of territories]. *Bulletin of VSU. Geography. Geoecology*. 2009;2:16–20. Russian.
18. Isachenko TY, Isachenko GA, Ozerova SD. *Otsenka rekreatsionnoy narushennosti I regulirovaniye nagruzok na osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriyakh Sankt-Peterburga* [Assessment of recreational disturbance and regulation of loads in specially protected natural areas of St. Petersburg]. *Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences*. 2020;65(1):16–32. Russian.

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 664.2

КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕСТРУКЦИИ КРАХМАЛА

М. А. АТРОШКО¹⁾, В. В. ЛИТВЯК²⁾, С. Н. ШАХАБ¹⁾, В. А. КРАВЧЕНКО¹⁾, А. Н. БАТЯН¹⁾

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

²⁾Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья –
филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха»,
ул. Некрасова, 11, 140051, Красково, Люберецкий район, Московская обл., Россия

Образец цитирования:

Атрошко МА, Литвяк ВВ, Шахаб СН, Кравченко ВА, Батян АН. Квантово-химическое моделирование радиационно-индуцированной деструкции крахмала. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;2:48–56.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-48-56>

For citation:

Atroshko MA, Litvyak VV, Shahab SN, Kravchenko VA, Balyan AN. Quantum-chemical simulation of radiation-induced destruction of starch. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;2:48–56. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-48-56>

Авторы:

Михаил Александрович Атрошко – аспирант кафедры экологической химии и биохимии; младший научный сотрудник.

Владимир Владимирович Литвяк – доктор технических наук, доцент; главный научный сотрудник.

Сиямак Насер Шахаб – кандидат химических наук, доцент; заведующий кафедрой экологической химии и биохимии.

Вячеслав Анатольевич Кравченко – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры экологической медицины и радиобиологии.

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

Authors:

Mikhail A. Atroshko, postgraduate student at the department of ecological chemistry and biochemistry; junior researcher.

atroshkomikhail@gmail.com

Vladimir V. Litvyak, doctor of science (technical), docent; chief researcher.

besserk1974@mail.ru

Siyamak N. Shahab, PhD (chemistry), docent; head of the department of ecological chemistry and biochemistry.

siyamakshahab@mail.ru

Vyacheslav A. Kravchenko, PhD (biology), docent; associate professor at the department of environmental medicine and radiobiology.

kravchenko.v.anat@gmail.com

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

ant_b@tut.by

Воздействие на нативный крахмал ионизирующим излучением является перспективной и экологически безопасной технологией целенаправленного изменения физико-химических свойств крахмала. Экологичность облученного крахмала обусловлена прежде всего его свойством сорбировать тяжелые металлы и радиоактивные изотопы. Кроме того, облученный крахмал может применяться в технических целях в различных отраслях современного хозяйственного комплекса: целлюлозно-бумажной промышленности, медицине, строительной промышленности, деревообработке, литьевом (литейном) производстве. Крахмал может выступать в качестве пищевого волокна с пребиотическими свойствами и способен расщепляться ферментными системами микроорганизмов кишечника, а также активно участвовать в процессе его перистальтики.

Объектом исследования служили молекулы, которые образуются в химических реакциях, протекающих при радиационном облучении крахмала. Установлено, что облучение полисахаридов снижает их точку плавления и вращение плоскости поляризации, приводит к потемнению, образованию формальдегида. При облучении дозой свыше 150 кГр повреждается кристаллическая часть крахмала, уменьшается его молекулярная масса и длина цепи. При облучении дозой свыше 600 кГр уменьшается степень полимеризации крахмала, что приводит к снижению удельной вязкости амилозы и амилопектина. С увеличением дозы облучения повышается растворимость крахмала в воде. При его облучении изменяется чувствительность к ферментам и происходит разрыв α -1 \rightarrow 4-гликозидных связей. Редуцирующая способность крахмала увеличивается пропорционально дозе облучения (начиная с дозы 10 кГр), возрастает кислотность (активатор – кислород), но снижается с увеличением его влажности. При облучении крахмала образуются фрагменты полиозидных цепей частично деградированных декстринов различной длины, а также продукты радиолитического распада (оксиметилфурфурол, формалин и др.). Образуются также свободные кислоты и сложные эфиры, которые гидролизуются в условиях предельных значений pH, повышая кислотность. Методами квантовой химии доказана принципиальная возможность образования в крахмале свободных радикалов и их последующее взаимодействие с полимером. Найдены наиболее стабильные конформеры по значениям полной энергии молекул и рассчитаны их физико-химические свойства.

Ключевые слова: крахмал; радиационное облучение; свободный радикал; теория функционала плотности.

QUANTUM-CHEMICAL SIMULATION OF RADIATION-INDUCED DESTRUCTION OF STARCH

M. A. ATROSHKO^a, V. V. LITVYAK^b, S. N. SHAHAB^a, V. A. KRAVCHENKO^a, A. N. BATYAN^a

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

*^bAll-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing –
Branch of Russian Potato Research Centre,*

*11 Nekrasov Street, Kraskovo 140051, district Luberetskiy, Moscow region, Russia
Corresponding author: M. A. Atroshko (atroshkomikhail@gmail.com)*

Exposure to native starch by ionizing radiation is a promising and environmentally safe technology for purposefully changing the physico-chemical properties of starch. The environmental friendliness of irradiated starch due to the possibility of its use in various spheres of human life. It can be a good sorbent of heavy metals and radioactive isotopes. In addition, irradiated starch can also be successfully used for technical purposes in various branches of the modern economic complex: pulp and paper industry, medicine, construction industry, woodworking, injection molding. Starch can act as a dietary fiber with probiotic properties and is able to be broken down by the enzyme systems of intestinal microorganisms, as well as actively participate in the process of intestinal peristalsis.

The object of the study was the molecules formed in chemical reactions occurring during the radiation exposure of starch. It has been established that irradiation of polysaccharides reduces their melting point and rotation of the polarization plane, darkening is observed, and formaldehyde is formed. When irradiated with a dose of more than 150 kGy, the crystalline part of starch is damaged, its molecular weight and chain length decrease. When irradiated with a dose of more than 600 kGy, a decrease in the degree of starch polymerization is observed, which leads to a decrease in the specific viscosity of amylose and amylopectin. With an increase in the radiation dose, the solubility of starch in water increases. When irradiated, the sensitivity to enzymes changes and α -1 \rightarrow 4 bonds are broken. The reducing ability increases in proportion to the radiation dose (starting from a dose of 10 kGy), the acidity of starch increases (the activator is oxygen), but decreases with increasing moisture. When starch is irradiated, fragments of polyoside chains of various lengths of partially degraded dextrans are formed, as well as radiolysis products (hydroxymethyl furfural, formalin, etc.). Free acids and esters are also formed, which hydrolyze at pH extremes, increasing acidity. Quantum chemistry methods have proved the fundamental possibility of the formation of free radicals in food starch and the possibility of their subsequent interaction with the polymeric chains of starch. The most stable conformers were found from the values of the total energy of the molecules, and their physicochemical and antioxidant properties were calculated.

Keywords: starch; radiation exposure; free radical; density functional theory.

Введение

Облучение нативного крахмала ионизирующим излучением является перспективной и экологически безопасной технологией целенаправленного изменения его физико-химических свойств. Энергия воздействия ионизирующего излучения на нативный крахмал не вызывает появления радиоактивных изотопов углерода, водорода и кислорода. Атомы углерода, водорода и кислорода, составляющие мономеры крахмала (остатки глюкопиранозы), остаются стабильными после воздействия ионизирующим гамма-излучением.

Облученный крахмал является экологически безопасным продуктом: он не представляет опасности для окружающей среды и может найти широкое применение в хозяйственном комплексе (пищевой промышленности, медицине и технических целях).

Нативный крахмал после воздействия ионизирующим излучением и стабилизации физико-химических свойств в результате свободнорадикальных сшивок своих полимерных цепей (амилозы и амилопектина) приобретает свойства резистентности. Он становится слабо гидролизуемым амилолитическими ферментами и слабо растворимым в воде при нагревании. Такой крахмал (глюкоолигосахариды) может выступать в качестве пищевого волокна с пребиотическими свойствами и способен расщепляться ферментными системами микроорганизмов кишечника, а также активно участвовать в процессе его перистальтики. Он может быть хорошим сорбентом тяжелых металлов и радиоактивных изотопов. Кроме того, облученный крахмал может с успехом быть использован для технических целей в различных отраслях современного хозяйственного комплекса: целлюлозно-бумажной промышленности, медицине, строительной промышленности, деревообработке, литейном производстве.

Нативные крахмалы и крахмалы с целенаправленно измененными физико-химическими свойствами – важные коммерческие продукты, которые находят широкое применение в различных областях промышленности [1–5].

В то же время информация о механизмах целенаправленного изменения физико-химических свойств крахмала в литературе практически отсутствует [6].

Цель исследования – определить принципиальную возможность образования в крахмале свободных радикалов в ответ на облучение ионизирующим излучением и оценить возможность их последующего взаимодействия с полимерными цепями крахмала.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования служили молекулы, которые образуются в химических реакциях, протекающих при облучении крахмала высокоэнергетическими электронами.

Расчеты с применением метода теории функционала плотности (DFT) для соединений проведены с помощью функционала *RB3LYP* в базе $6-31++G^*$ [7; 8]. Все квантово-химические расчеты выполнены с использованием программного пакета *Gaussian 16* и программы для визуализации результатов *GaussView 06* на персональном компьютере с процессором *intelcore i7* (2.21 GHz CPU) с установленной операционной системой *Ubuntu 18.04*. Для расчета эффекта растворителя был использован метод IEFPCM. Формализм интегральных уравнений PCM является наиболее популярной версией PCM. В нем используется полость в форме молекулы, состоящая из центрированных на ядрах сфер.

Для расчета спектров поглощения соединений была использована зависящая от времени теория функционала плотности (TD-DFT). Теоретические спектры поглощения оптимизированных соединений рассчитаны с применением метода TD-RB3LYP в базе $6-31++G^*$, где растворителем была вода.

В работе рассчитаны полные электронные плотности (DOS), потенциал ионизации (IP), сродство к электрону (EA), глобальная твердость (η), электроотрицательность (χ), электронный химический потенциал (μ), электрофильность (ω) и химическая мягкость (S) соединений. Потенциал ионизации определяется как количество энергии, необходимое для удаления электрона из молекулы, сродство к электрону – как энергия, выделяемая при добавлении протона в систему. Это связано с энергией E_{HOMO} и E_{LUMO} соотношениями (1) и (2):

$$\text{IP} = -E_{\text{HOMO}}, \quad (1)$$

$$\text{EA} = -E_{\text{LUMO}}. \quad (2)$$

По значениям IP и EA можно определить электроотрицательность и общую жесткость (η) соединений. Электроотрицательность характеризуется мерой силы атома или группы атомов притягивать электроны, жесткость – свойством, определяющим их стабильность и реакционную способность. Эти показатели можно определить и количественно оценить с помощью уравнений (3) и (4):

$$\eta = (\text{IP} - \text{EA})/2, \quad (3)$$

$$\chi = (\text{IP} + \text{EA})/2. \quad (4)$$

Общая жесткость соответствует энергетическому разрыву LUMO-HOMO. Молекула с небольшим энергетическим разрывом обладает высокой химической реактивностью, низкой кинетической стабильностью и является мягкой молекулой, в то время как твердая молекула обладает большим энергетическим разрывом.

Химическую мягкость (S) – мера способности атома или группы атомов принимать электроны, которую можно оценить с помощью формулы (5):

$$S = 1/\eta. \quad (5)$$

Электронный химический потенциал (μ) рассчитывается по формуле (6):

$$\mu = -(IP + EA)/2. \quad (6)$$

Индекс электрофильности (ω), представляющий собой меру снижения энергии в связи с максимальным потоком электронов между донором и акцептором, определяется уравнением (7):

$$\omega = \mu^2 / 2\eta. \quad (7)$$

Согласно определению, этот индекс указывает на склонность химических частиц принимать электроны. Сильный нуклеофил характеризуется более низким значением μ , ω , а сильный электрофил – высоким значением μ , ω .

Карты молекулярного электростатического потенциала (МЭП) показывают электронную плотность в молекулах и весьма информативны в отношении распределения ядерных и электронных зарядов молекул.

На поверхности МЭП красный цвет относится к обогащенной электронами (отрицательной) области, синий цвет – к бедной электронами (положительной) области, а зеленый цвет обозначает нулевой электростатический потенциал.

Результаты исследования и их обсуждение

Ранее установлено [9; 10], что облучение вызывает произвольный, а не систематический разрыв α -1 \rightarrow 4 гликозидных связей крахмала. Редуцирующая способность увеличивается пропорционально дозе облучения крахмала (начиная с дозы 10 кГр), возрастает кислотность (активатор – кислород), но снижается с его увеличением влажности. При облучении образуются фрагменты полиозидных цепей частично деградированных декстринов различной длины, а также продукты радиолитического распада (оксиметилфурфурол, формалин и др.). Также образуются свободные органические кислоты и сложные эфиры, что повышает общую кислотность.

При облучении влажного крахмала образуются радикалы воды OH и e , которые, с одной стороны, ускоряют деструкцию и окисление крахмала, а с другой – способствуют рекомбинации и элиминации радикалов.

На устойчивость свободных радикалов влияют и ионы водорода (H^+), в присутствии которых радикалы также рекомбинируются и исчезают.

Свободнорадикальные механизмы облучения крахмала можно представить следующим образом (рис. 1) [9].

Проведенные квантово-механические расчеты и поиск равновесной геометрии молекул I и II (рис. 2) подтверждают возможность протекания химических реакций по свободнорадикальному механизму после облучения нативного крахмала (табл. 1 и 2).

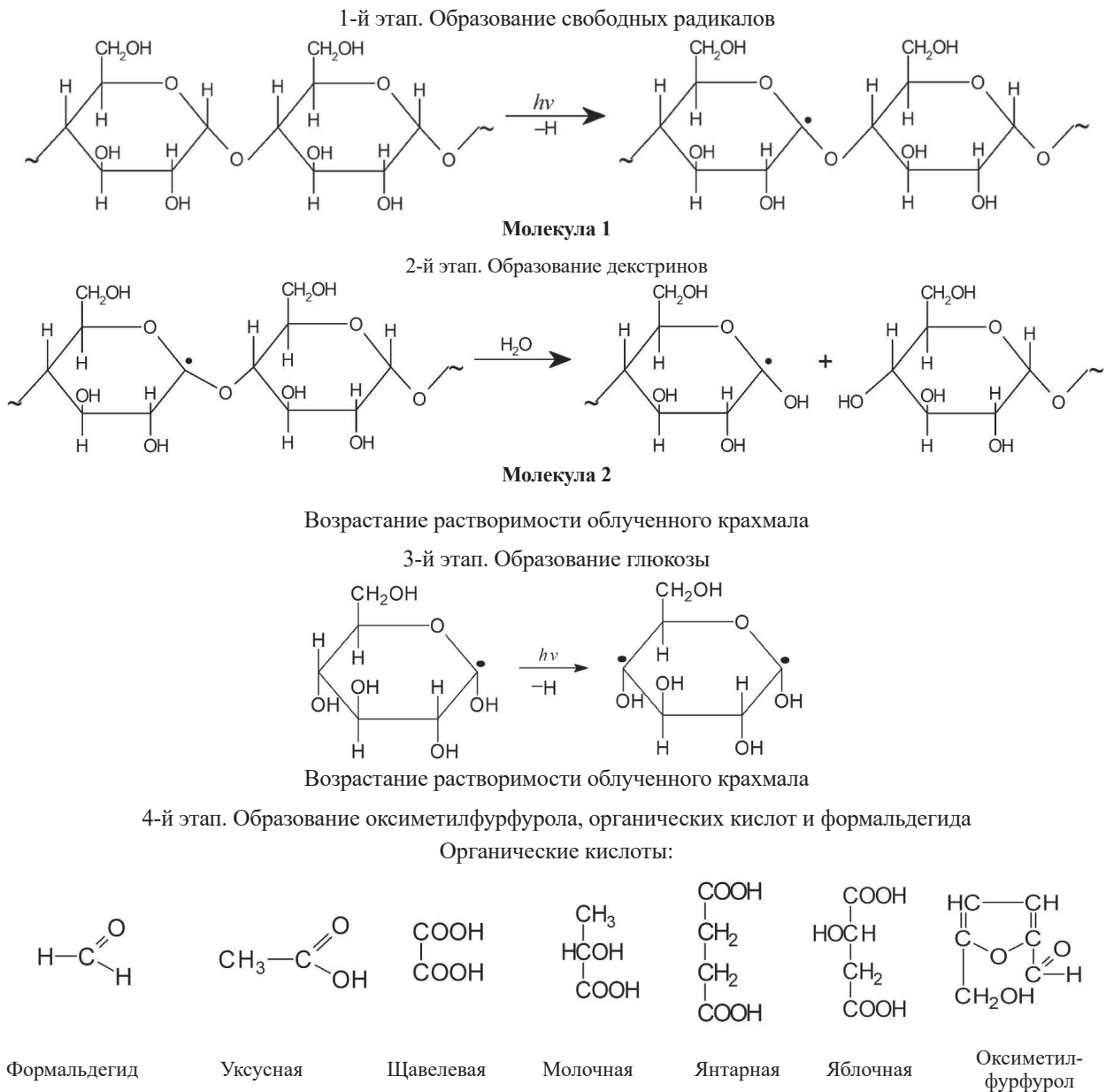
Таблица 1:

Рассчитанные электронные спектры поглощения молекул крахмала I и II

Table 1:

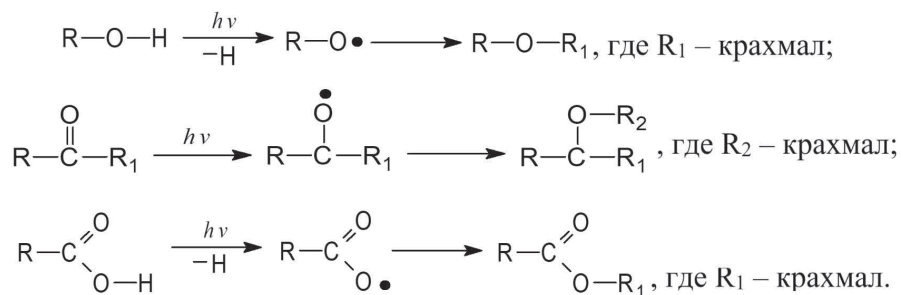
Calculated electronic absorption spectra of starch molecules I and II

Состояние	Длина волны, нм	Разложение волновых функций по однократно возбужденной конфигурации	Сила осциллятора (f)
Рассчитанный электронный спектр поглощения молекулы I			
$S_0 \rightarrow S_{13}$	236,21	$0,11(91 \rightarrow 10) - 0,25(91 \rightarrow 102) - 0,15(82 \rightarrow 91) - 0,13(83 \rightarrow 91) - 0,28(85 \rightarrow 91) + 0,17(86 \rightarrow 91) - 0,30(87 \rightarrow 91) - 0,43(88 \rightarrow 91) + 0,68(89 \rightarrow 91)$	0,0969
Рассчитанный электронный спектр поглощения молекулы II			
$S_0 \rightarrow S_{14}$	227,41	$-0,11(96 \rightarrow 104) - 0,28(96 \rightarrow 105) + 0,14(96 \rightarrow 106) + 0,77(96 \rightarrow 107) + 0,11(96 \rightarrow 108) + 0,25(96 \rightarrow 109) + 0,28(96 \rightarrow 110) + 0,22(96 \rightarrow 111) + 0,16(96 \rightarrow 114)$	0,0279



Возрастание общей титруемой кислотности облученного крахмала

5-ый этап. Перегруппировка и сшивка полимерных цепей крахмала (амилозы и амилопектина)



Резкое понижение растворимости и кислотности облученного крахмала. Образующийся полимер нерастворим в холодной воде, слабо гидролизуется амилолитическими ферментами (устойчив к действию ферментов)

Рис. 1. Возможные свободнорадикальные механизмы облучения крахмала

Fig. 1. Possible free-radical mechanisms of starch irradiation

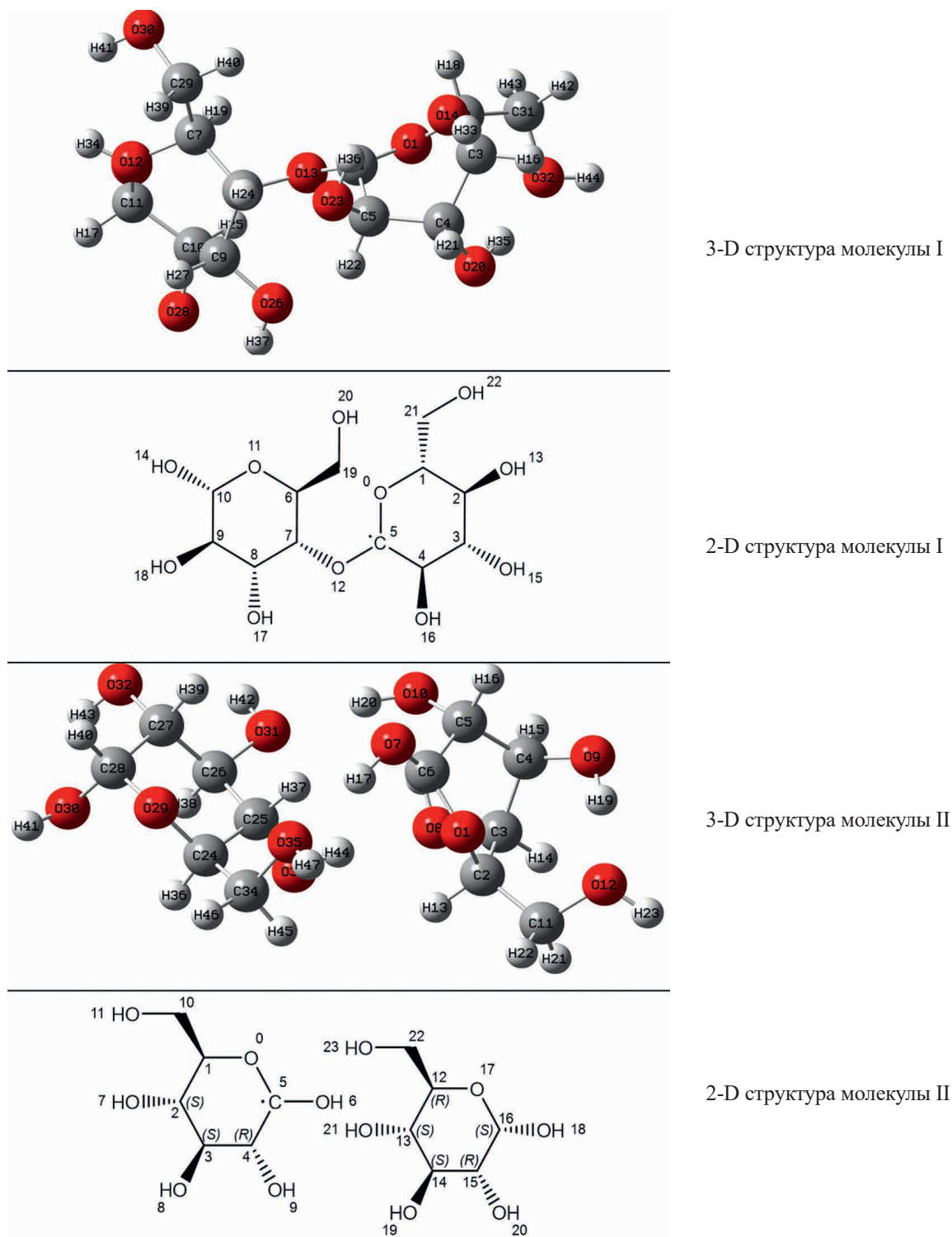


Рис. 2. Характеристики модельных молекул крахмала I и II

Fig. 2. Characteristics of model starch molecules I and II

Результаты расчета 20 возбужденных состояний соединения I приведены в табл. 2. Как видно, наиболее интенсивный пик поглощения соединения I при $\lambda_{\max} = 236,21$ нм наблюдается при силе осциллятора $f = 0,0969$.

Максимум длины волны обусловлен переносом заряда электрона в возбужденное синглетное состояние $S_0 \rightarrow S_{13}$, которое является волновой функцией, включающей несколько конфигураций для одноэлектронных возбуждений. Возбуждение электрона с 89В молекулярной орбитали на нижнюю вакантную молекулярную орбиталь 91В дает главный вклад в полосу поглощения при 236,21 нм. Самый сильный пик поглощения соединения II при $\lambda_{\max} = 227,41$ нм наблюдается при силе осциллятора $f = 0,0279$. Максимум длины волны обусловлен переносом заряда электрона в возбужденное синглетное состояние $S_0 \rightarrow S_{14}$, которое является волновой функцией, включающей несколько конфигураций для одноэлектронных возбуждений.

Другие возбужденные состояния соединений имеют очень малую интенсивность ($f \approx 0$) или запрещены по симметрии.

Анализ полных электронных плотностей показывает, что ширина запрещенной зоны соединения I составляет 0,17120 эВ. Общая твердость (η) соединения I составляет 0,17332 эВ (табл. 2).

Как показано на МЭП-карте (рис. 3), отрицательная область соединения I (красного цвета) сфокусирована на атомах O13 и O30, положительная область (синего цвета) локализована на атомах H34, H33.

Таблица 2

Электронные свойства модельных молекул крахмала I и II

Table 2

Electronic properties of model starch molecules I and II

Электронные свойства молекулы I		Электронные свойства молекулы II	
Свойства	Результаты	Свойства	Результаты
E_{HOMO} (eV)	-0,17545	E_{HOMO} (eV)	-0,18099
E_{LUMO} (eV)	-0,00425	E_{LUMO} (eV)	-0,00627
IP (eV)	0,17545	IP (eV)	0,18099
EA (eV)	0,00425	EA (eV)	0,00627
Eg (eV)	0,17120	Eg (eV)	0,17472
μ (eV)	-0,08985	μ (eV)	-0,09363
η (eV)	0,17332	η (eV)	0,17785
S (eV)	5,76950	S (eV)	5,62255
χ (eV)	0,17757	χ (eV)	0,18412
ω (eV)	0,00069	ω (eV)	0,00077
ω^+ (eV)	0,00402	ω^+ (eV)	0,00436
ω^- (eV)	0,01135	ω^- (eV)	0,01199

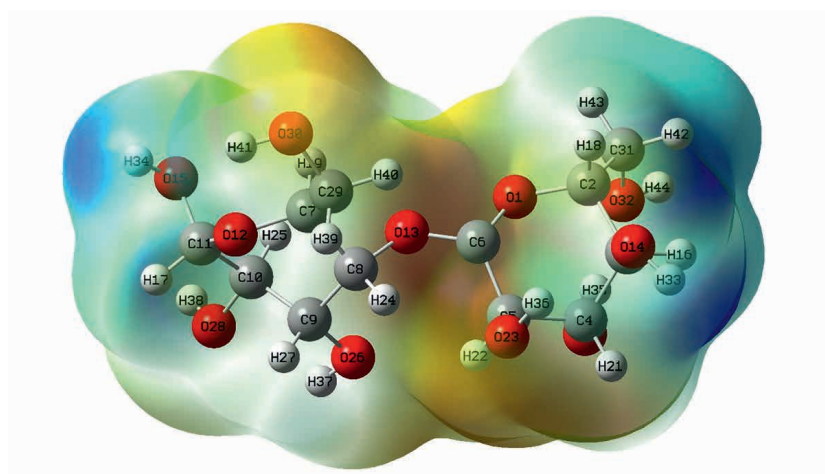


Рис. 3. Карта молекулярного электростатического потенциала молекулы I

Fig. 3. Molecular electrostatic potential map of molecule I

Согласно расчетам полных электронных плотностей, ширина запрещенной зоны соединения II составляет 0,1712 эВ, его общая твердость (η) – 0,173325 эВ (табл. 2)

Как следует из МЭП-карты соединения II (рис. 4), отрицательная область (красного цвета) локализована на атомах O9 и O10, положительная область (синего цвета) – на атомах H23, H47, H41.

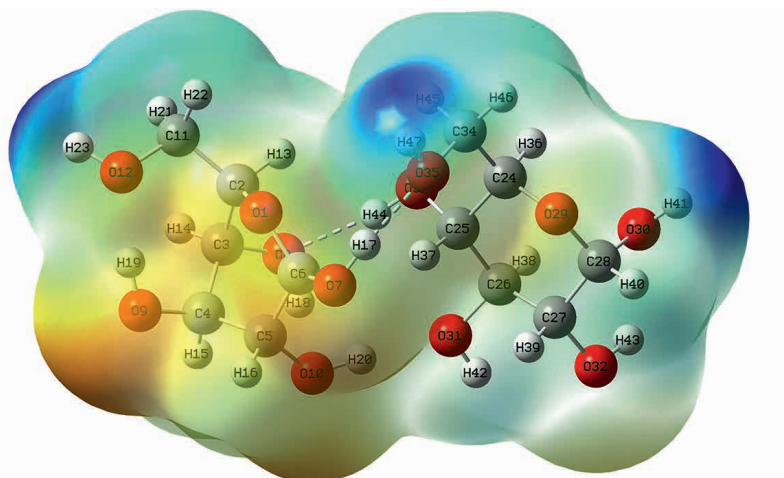


Рис. 4. Карта молекулярного электростатического потенциала молекулы II

Fig. 4. Molecular electrostatic potential map of molecule II

Следует отметить, что физико-химические свойства облученного крахмала не постоянны во времени. Свободные радикалы способны сохраняться до двух лет и оказывать значительное влияние на физико-химические свойства крахмала. Со временем растворимость и кислотность облученных крахмалов снижаются, что приводит к формированию структур, полностью нерастворимых в воде.

Заключение

Проанализировав данные исследования, приходим к следующим выводам.

1. В результате квантово-механических расчетов доказана принципиальная возможность образования в нативном крахмале при его облучении ионизирующим излучением свободных радикалов и их последующего взаимодействия с полимерными цепями крахмала.

2. Применив неэмперический метод функционала плотности TD/B3LYP/6-31++G*, рассчитаны электронные спектры соединений I и II в водной среде, которые составляют $\lambda_{\max} = 236,21$ нм при $f = 0,0969$ и $\lambda_{\max} = 227,41$ нм соответственно при $f = 0,0279$.

3. Расчеты показали, что ширина запрещенной зоны для молекул I и II составляет 0,1712 и 0,17472 эВ соответственно.

4. Анализ молекулярного электростатического потенциала свидетельствует, что у соединения I наибольшей электронной плотностью характеризуются атомы O13 и O30, у соединения II – атомы O9 и O10.

5. Понимание механизма физико-химического воздействия ионизирующего облучения на крахмал позволит получать продукты различного состава и свойств, расширить сферу и эффективность их практического использования.

Библиографические ссылки

1. Sofi SA, Anjum Ayoub, Awsi Jan. Resistant starch as functional ingredient: A review. *International Journal of Food Science and Nutrition*. 2017;2(6):195–199.
2. Соломина ЛС, Соломин ДА. Исследования процесса получения амилопекинового фосфатного крахмала. *ХИПС*. 2018;1(3):27–35.
3. Руськина АА, Попова НВ, Науменко НВ, Руськин ДВ. Модификация крахмала с помощью ультразвукового воздействия как инструмент изменения его технологических характеристик. *Вестник ЮУрГУ. Серия Пищевые и биотехнологии*. 2017;5(3):12–20.
4. Кряжев ВН, Романов ВВ, Широков ВА. Последние достижения химии и технологии производных крахмала. *Химия растительного сырья*. 2010;1:5–12.
5. Литвяк ВВ, Лукин НД, Симаков ЕА, Дегтярев ВА, Кузьмина ЛГ, Кузина ЛБ. *Картофель и технологии его глубокой переработки*. Москва: ФЛИНТА; 2021. 893 с.
6. Литвяк В, Алексеев М, Канарский А. Формирование крахмальной гранулы и механизм химической модификации крахмала. *Наука и инновация*. 2016;1(3):63–67.

7. Shahab S, Alhosseini Almodarresiyeh H, Kumar R, Darroudi M. A study of molecular structure, UV, IR, and ¹H NMR spectra of a new dichroic dye on the basis of quinoline derivative. *Journal of Molecular Structure*. 2015;1:1088–1098.
8. Shahab S, Filippovich L, Sheikhi M, Kumar R, Dikisar E, Yahyaei H, Muravsky A. Polarization, excited states, trans-cis properties and anisotropy of thermal and electrical conductivity of the 4-(phenyldiazenyl)aniline in PVA matrix. *Journal of Molecular Structure*. 2017;1:1141–1156.
9. Литвяк ВВ, Батян АН, Кравченко ВА. Модификация физико-химических и экологических свойств крахмала в результате его электронного облучения. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2018;3:62–68.

References

1. Sofi SA, Anjum Ayoub, Awsi Jan. Resistant starch as functional ingredient: A review. *International Journal of Food Science and Nutrition*. 2017;2(6):195–199.
2. Solomina LS, Solomin DA. *Issledovaniya processa poluchenija amilopekinovogo fosfatnogo krakhmala* [Studies of the process of obtaining amylopectin phosphate starch]. *HIPS*. 2018;1(3):27–35. Russian.
3. Rus'kina AA, Popova NV, Naumenko NV, Rus'kin DV. *Modifikatsiya krakhmala s pomoshch'yu ul'trazvukovogo vozdeistviya kak instrument izmeneniya ego tekhnologicheskikh kharakteristik* [Modification of starch by means of ultrasonic exposure as a tool for changing its technological characteristics]. *Vestnik YuUrGU. Seriya Pishchevye i biotekhnologii*. 2017;5(3):12–20. Russian.
4. Kryazhev VN, Romanov VV, Shirokov VA. *Poslednie dostizheniya khimii i tekhnologii proizvodnykh krakhmala* [Recent advances in starch derivatives chemistry and technology]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials]. 2010;1:5–12. Russian.
5. Litvyak VV, Lukin ND, Simakov EA, Degtyarev VA, Kuz'mina LG, Kuzina LB. *Kartofel' i tekhnologii ego glubokoi pererabotki* [Potatoes and technologies of its deep processing]. Moscow: FLINT; 2021. 893 p. Russian.
6. Litvyak V, Alekseenko M, Kanarskii A. *Formirovanie krakhmal'noi granuly i mekhanizm khimicheskoi modifikatsii krakhmala* [Formation of starch granules and mechanism of chemical modification of starch]. *Nauka i innovatsiya* [Science and innovation]. 2016;1(3):63–67. Russian.
7. Shahab S, Alhosseini Almodarresiyeh H, Kumar R, Darroudi M. A study of molecular structure, UV, IR, and ¹H NMR spectra of a new dichroic dye on the basis of quinoline derivative. *Journal of Molecular Structure*. 2015;1:1088–1098.
8. Shahab S, Filippovich L, Sheikhi M, Kumar R, Dikisar E, Yahyaei H, Muravsky A. Polarization, excited states, trans-cis properties and anisotropy of thermal and electrical conductivity of the 4-(phenyldiazenyl)aniline in PVA matrix. *Journal of Molecular Structure*. 2017;1:1141–1156.
9. Litvyak VV, Batyan AN, Kravchenko VA. *Modifikatsiya fiziko-khimicheskikh i ekologicheskikh svoystv krakhmala v rezul'tate ego elektronnoho oblucheniya* [Modification of physico-chemical and environmental properties of starch as a result of its electron irradiation]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universitetata. Ekologiya* [Journal of the Belarusian State University. Ecology]. 2018;3:62–68. Russian.

Статья поступила в редколлегию 28.02.2023.
Received by editorial board 28.02.2023.

УДК 614.876:614.841

МЕТОД ОЦЕНКИ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА И НАСЕЛЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИНГАЛЯЦИОННОГО ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ПРИ ПОЖАРАХ НА ТЕРРИТОРИЯХ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

В. В. КЛЯУС¹⁾, О. М. ЖУКОВА¹⁾, Д. И. ГУСЕЙНОВА¹⁾, Е. А. БАБИЧ¹⁾

¹⁾Научно-практический центр гигиены,
ул. Академическая, 8, 220012, г. Минск, Беларусь

В исследовании представлен метод оценки доз облучения для участников пожаротушения и населения в результате ингаляционного поступления радионуклидов при чрезвычайных ситуациях (лесных пожарах) на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения (далее – метод), разработанный в результате выполнения задания «Разработка методов оценки доз облучения, ожидаемых в результате ингаляционного поступления радионуклидов при чрезвычайных ситуациях на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения» мероприятия 1.2 «Снижение рисков трансграничных переносов радиоактивных элементов при чрезвычайных ситуациях на радиоактивно загрязненных территориях государств-участников Союзного государства и повышение оперативности их ликвидации» Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС (далее – ЧАЭС) в части ответственности белорусской стороны. Применение данного метода позволит провести оценку объемной активности радионуклидов в воздухе при лесных пожарах; ожидаемых эффективных доз облучения персонала в результате ингаляционного поступления радионуклидов при тушении лесных пожаров на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения и ожидаемых эффективных доз облучения населения от ингаляционного поступления радионуклидов при лесных пожарах на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения. Приведены результаты апробации метода и сравнительный анализ результатов расчета ингаляционных доз облучения персонала и населения, полученных с использованием метода, с результатами моделирования, полученными с помощью программного модуля JRODOS-Wildfire. Для оценки последствий сценария пожара на участке Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (далее – ПГРЭЗ) с плотностью загрязнения территории $^{137}\text{Cs} - 3,0-3,7 \times 10^6 \text{ Бк/м}^2$, $^{90}\text{Sr} - 9,2 \times 10^5 \text{ Бк/м}^2$, $^{239}\text{Pu} - 9,1-12 \times 10^3 \text{ Бк/м}^2$, $^{241}\text{Am} - 2,1-2,6 \times 10^4 \text{ Бк/м}^2$ с помощью разработанного метода рассчитаны значения объемной активности радионуклидов на месте пожара в зоне дыхания персонала: для $^{238}\text{Pu} - 0,39 \times 10^{-2} \text{ Бк/м}^3$, $^{239,240}\text{Pu} - 0,67 \times 10^{-2} \text{ Бк/м}^3$, $^{241}\text{Am} - 1,59 \times 10^{-2} \text{ Бк/м}^3$, $^{90}\text{Sr} - 0,38 \text{ Бк/м}^3$, для $^{137}\text{Cs} - 1,03 \text{ Бк/м}^3$. Прогнозируемые значения ингаляционных доз облучения персонала составят $1,70 \times 10^{-6} \text{ Зв}$, а ингаляционные дозы облучения населения, проживающего на расстоянии 87 км от места пожара (г. Мозырь), – $4,1 \times 10^{-11} \text{ Зв}$ (для взрослых).

Образец цитирования:

Кляус ВВ, Жукова ОМ, Гусейнова ДИ, Бабич ЕА. Метод оценки доз облучения персонала и населения в результате ингаляционного поступления радионуклидов при пожарах на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2023;2:57–67.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-57-67>

For citation:

Kliaus VV, Zhukova OM, Huseinava DI, Babich AA. Method for dose assessment to workers and public as a result of inhalation intake of radionuclides during fires at the territories with a high level of radioactive contamination. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;2:57–67. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-57-67>

Авторы:

Виктория Вячеславовна Кляус – кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности.

Ольга Митрофановна Жукова – кандидат технических наук, доцент; старший научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности.

Диана Ивановна Гусейнова – специалист лаборатории радиационной безопасности.

Елена Анатольевна Бабич – ведущий специалист лаборатории радиационной безопасности.

Authors:

Viktoryia V. Kliaus, PhD (biology), leading researcher at the laboratory of radiation safety.

vkliaus@gmail.com

Olga M. Zhukova, PhD (engineering), docent; senior researcher at the laboratory of radiation safety.

olga.zhukova.47@inbox.ru

Dziyana I. Huseinava, specialist at the laboratory of radiation safety.

dianahuseinava@gmail.com

Alena A. Babich, leading specialist at the laboratory of radiation safety.

aljenababich@gmail.com

Суммарное значение дозы ингаляционного облучения лица из персонала многократно в течение года выполнявшего тушения пожаров в ПГРЭЗ в 2019 г., рассчитанная с помощью модуля JRODOS-Wildfire, составило $7,5 \times 10^{-6}$ Зв/год. Все расчетные уровни доз облучения не превышают установленных пределов доз облучения – 5 мЗв и 1 мЗв соответственно и свидетельствуют об отсутствии необходимости применения специальных защитных мер для персонала и для населения.

Ключевые слова: радионуклид; Чернобыльская зона отчуждения; лесной пожар; плотность загрязнения; объемная активность; удельная активность; ингаляционная доза облучения; персонал; население.

METHOD FOR DOSE ASSESSMENT TO WORKERS AND PUBLIC AS A RESULT OF INHALATION INTAKE OF RADIONUCLIDES DURING FIRES AT THE TERRITORIES WITH A HIGH LEVEL OF RADIOACTIVE CONTAMINATION

V. V. KLIAUS^a, O. M. ZHUKOVA^a, D. I. HUSEINA^a, A. A. BABICH^a

^aScientific Practical Centre of Hygiene
8 Akademičnaja Street, Minsk 220012, Belarus
Corresponding author: V. V. Kliaus (vkliaus@gmail.com)

This article presents a method for estimating exposure doses for persons participating in firefighting and the public as a result of inhalation intake of radionuclides in emergency situations (forest fires) in areas with a high level of radioactive contamination (hereinafter referred to as the method), developed as a result of the assignment «Development of methods for estimating exposure doses, expected as a result of inhalation intake of radionuclides in emergency situations in territories with a high level of radioactive contamination» activity 1.2 «Reducing the risks of transboundary transfers of radioactive elements in emergency situations in the radioactively contaminated territories of the member states of the Union State and increasing the efficiency of their elimination» of the Program of Joint Activities of Russia and Belarus within the framework of the Union State for the protection of the public and rehabilitation of territories affected by the disaster at the Chernobyl nuclear power plant (hereinafter – the ChNPP) in terms of the responsibility of the Belarusian side. The application of this method will make it possible to assess the volumetric activity of radionuclides in the air during forest fires; committed effective exposure doses to workers as a result of inhalation intake of radionuclides during forest fire extinguishing in areas with a high level of radioactive contamination and expected effective exposure doses to the public from inhalation intake of radionuclides during forest fires in areas with a high level of radioactive contamination. The results of testing the method and a comparative analysis of the results of calculating the inhalation exposure doses of workers and the public obtained using the method with the results of modeling obtained using the JRODOS-Wildfire software module [1] are presented. To assess the consequences of a fire scenario in a section of the Polesky State Radiation-Ecological Reserve (hereinafter – PSRER) with a contamination density of the territory of $^{137}\text{Cs} - 3.0-3.7 \times 10^6 \text{ Bq/m}^2$, $^{90}\text{Sr} - 9.2 \times 10^5 \text{ Bq/m}^2$, $^{239}\text{Pu} - 9.1-12 \times 10^3 \text{ Bq/m}^2$, $^{241}\text{Am} - 2.1-2.6 \times 10^4 \text{ Bq/m}^2$ Using the developed method, the values of volumetric activity of radionuclides at the fire site in the workers breathing zone were calculated: for $^{238}\text{Pu} - 0,39 \times 10^{-2} \text{ Bq/m}^3$, $^{239,240}\text{Pu} - 0,67 \times 10^{-2} \text{ Bq/m}^3$, $^{241}\text{Am} - 1,59 \times 10^{-2} \text{ Bq/m}^3$, $^{90}\text{Sr} - 0,38 \text{ Bq/m}^3$, for $^{137}\text{Cs} - 1,03 \text{ Bq/m}^3$. The predicted values of inhalation exposure doses of workers will be $1,70 \times 10^{-6} \text{ Sv}$, and inhalation exposure doses of the population living at a distance of 87 km from the fire site (Mozyr city) will be $4,1 \times 10^{-11} \text{ Sv}$ (for adults). The total value of the inhalation exposure dose for a worker who repeatedly extinguished fires in the PSRER in 2019 during the year, calculated using the JRODOS-Wildfire module, was $7,5 \times 10^{-6} \text{ Sv/year}$. All estimated levels of radiation doses do not exceed the established dose limits – 5 mSv and 1 mSv, respectively, and indicate that there is no need to apply special protective measures for workers and the public.

Keywords: radionuclide; Chernobyl exclusion zone; forest fire; contamination density; volumetric activity; mass activity inhalation exposure dose; workers; public.

Введение

Территория лесного фонда Республики Беларусь, отнесенная к зонам радиоактивного загрязнения, по состоянию на 1 января 2020 г. составляет 1559,5 тыс. га [1]. Максимальные плотности загрязнения территории лесного фонда радионуклидами – ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238,239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в Республике Беларусь наблюдаются на территории ПГРЭЗ. На всей территории ПГРЭЗ имеют место значимые уровни загрязнения всеми долгоживущими радионуклидами, тогда как в других регионах республики радиационную обстановку определяют ^{137}Cs и ^{90}Sr , а $^{238,239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am присутствуют в спектре загрязнения в малых количествах [2].

Серьезной проблемой на загрязненных радионуклидами территориях в настоящее время являются лесные пожары. До аварии на ЧАЭС леса покрывали около 53 % территории Чернобыльской зоны

отчуждения (далее – ЧЗО), а после 1986 г. хозяйственная деятельность на ее территории прекратилась, что привело к значительному разрастанию растительности и увеличению площади лесов, создав условия, благоприятные для возгорания и распространения пожаров. В настоящее время около 38 % территории ЧЗО занимают сосновые леса, 30 – широколиственные леса, а остальные 32 % – обезлесенные и бывшие сельскохозяйственные угодья [3]. Радионуклиды ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{238,239,240}\text{Pu}$ сосредоточены в основном в подстилке и верхнем слое почвы в лесах и лугах ЧЗО [4].

Пожары в ЧЗО случаются регулярно, по статистике 10–15 случаев ежегодно, преимущественно в летнее время. С 1993 по 2013 г. в ЧЗО произошло более 1250 природных пожаров различных видов [5]. Наиболее крупные за последние годы пожары в ЧЗО наблюдались в апреле – июне 2015 г. (огнем было охвачено суммарно около 160 га), а также в апреле 2020 г.

При проведении работ по тушению пожаров персонал ЧЗО подвергается внешнему облучению от радионуклидов, содержащихся в верхнем слое почвы и лесной подстилке, древостое и других лесных компонентах, а также внутреннему облучению от ингаляционного поступления радиоактивных аэрозолей с вдыхаемым воздухом [6]. Уровни внешнего облучения персонала при выполнении работ в ЧЗО могут быть установлены с помощью ТЛД-дозиметрии, которая проводится на постоянной основе, в то время как уровни внутреннего облучения от ингаляции радионуклидов оперативно можно установить только расчетным путем. Таким образом, оценка доз ингаляционного облучения работников (спасателей, лесников и других), участвующих в ликвидации пожаров, является на сегодняшний день крайне актуальной.

Кроме того, в средствах массовой информации регулярно появляются сообщения о том, что пожары на загрязненных радионуклидами территориях могут привести к ухудшению радиационной обстановки за пределами ЧЗО, в том числе в населенных пунктах (далее – НП). Для населения, проживающего в близлежащих НП, основным путем облучения при пожарах в ЧЗО будет ингаляционный (в результате переноса радиоактивных аэрозолей с территории ЧЗО). В связи с обеспокоенностью населения, а также с целью характера радиологического воздействия на население пожаров в ЧЗО необходимо выполнять оценку прогнозируемых доз ингаляционного облучения населения различных возрастных групп.

В настоящее время в Республике Беларусь отсутствуют утвержденные документы, содержащие методики оценки доз ингаляционного облучения персонала и населения при пожарах на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

В связи с вышеизложенным существует необходимость в разработке методических подходов к оценке доз облучения участников пожаротушения и населения в результате ингаляционного поступления радионуклидов при чрезвычайных ситуациях (лесных пожарах) на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения в отдаленный период после катастрофы на ЧАЭС.

Численные значения ожидаемых эффективных доз ингаляционного облучения персонала (участников пожаротушения) и населения позволят принимать решения о необходимости и масштабах проведения защитных мероприятий при пожарах в ЧЗО с учетом действующих нормативов (дозовых пределов)^{1, 2, 3}.

Материалы и методы исследования

Ожидаемая эффективная доза облучения лица из персонала в результате ингаляционного поступления ($E_{inh\ перс}$) радионуклидов без использования СИЗ органов дыхания при тушении лесных пожаров на территориях, загрязненных в результате катастрофы на ЧАЭС⁴, может быть рассчитана с использованием формулы:

$$E_{inh\ перс} = \sum_{i=1}^S (e(g)_i \times Av_i) \times v \times t, \quad (1)$$

где $E_{inh\ перс}$ – ожидаемая эффективная доза облучения лица из персонала в результате ингаляционного поступления радионуклидов, Зв;

$e(g)_i$ – дозовый коэффициент, равный ожидаемой эффективной дозе, обусловленной ингаляционным поступлением 1 Бк i -го радионуклида в организм в зависимости от возраста человека, с учетом процессов метаболизма радионуклида в организме, класса растворимости и размера частиц в радиоактивном аэрозоле, Зв/Бк;

Av_i – объемная активность i -го радионуклида в зоне дыхания персонала, Бк/м³;

¹Требования к радиационной безопасности: санитар. нормы и правила: утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь 28.12.2012 № 213. Радиационная гигиена. Вып. 4. Минск: РЦГЭиОЗ, 2013. С. 4–33.

²Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив: утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 28.12.12 № 213. Радиационная гигиена. Вып. 4. Минск: РЦГЭиОЗ; 2013. С. 34–167.

³Требования к обеспечению радиационной безопасности при проведении работ в зонах радиоактивного загрязнения: санитарные нормы и правила: утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 02.07.15 № 89. Минск: РЦГЭиОЗ, 2015. 12 с.

⁴Дворник А. М., Дворник А. А., Наумов А. Д., Архангельский А. В. Устройство для сжигания твердых материалов и отбора проб для анализа веществ, находящихся в дыме: патент ВУ 8964. Опубл. 11.02.12.

v – интенсивность ингаляции для персонала во время пожаротушения, м³/ч (значение интенсивности ингаляции принимается равным для взрослого человека при тяжелой физической нагрузке – 3 м³/ч);
 t – продолжительность вдыхания загрязненного воздуха персоналом, ч.

Значения дозовых коэффициентов $e(g)_i$ для персонала выбираются с учетом медианного по активности аэродинамического диаметра (далее – АМАД) частиц радиоактивных аэрозолей. Для определения АМАД частиц радиоактивных аэрозолей при пожарах рекомендуется использовать пробоотборные устройства с импактором, например, типа ПУ АИП-01Д НПП «Доза» [7]. Рекомендуемые значения дозовых коэффициентов для персонала $e(g)_i$ в зависимости от АМАД частиц.

Для определения объемной активности радионуклидов в воздухе на месте пожара требуется провести отбор проб аэрозолей атмосферного воздуха на высоте 1 м над поверхностью земли, для этого используют пробоотборники аэрозолей атмосферного воздуха, в которых частицы аэрозолей отбираются при текущей скорости ветра на фильтр (например, из ткани Петрянова).

Объемная активность i -го радионуклида Av_i в зоне дыхания участников пожаротушения может быть рассчитана по формуле:

$$Av_i = E_i \times R \times D, \quad (2)$$

где Av_i – средняя объемная активность аэрозолей в воздухе для рассматриваемого радионуклида i в зоне дыхания персонала, Бк/м³;

E_i – средняя удельная поверхностная активность радионуклида i (запас радионуклида i на единице площади горящего лесного материала), Бк/м²;

R – скорость распространения пожара, м/с;

D – параметр дисперсии, характеризующий пожар как плоский бесконечный источник, с/м².

Для пожаров средней и сильной интенсивности скорость распространения пожара (R) консервативно может быть принята равной 0,17 м/с. Для величины шероховатости подстилающей поверхности равной 0,1 м при нейтральном классе стабильности атмосферы значение параметра дисперсии (D) на высоте 1,5 м (в зоне дыхания персонала) равно 0,1 с/м².

Если проведение отбора проб на месте пожара не представляется возможным, оценку объемной активности радионуклидов (в том числе трансурановых элементов) проводят расчетным путем. Объемная активность i -го радионуклида (Av_i) в зоне дыхания участников пожаротушения при низовом пожаре, когда сгорает только лесная подстилка [6], может быть рассчитана по формуле:

$$A_{v_{\text{низовой}}}^i = 10^{-5} \times A_{s_bio,j,k}^i, \quad (3)$$

где $A_{v_{\text{низовой}}}^i$ – объемная активность i -го радионуклида в зоне дыхания персонала при низовом пожаре, Бк/м³;

10^{-5} – эмпирический коэффициент, равный отношению средней приземной объемной активности радионуклида i к запасу в горячем материале на единицу поверхности, 1/м;

$A_{s_bio,j,k}^i$ – средняя удельная поверхностная активность i -го радионуклида в биомассе горящего лесного материала j (лесная подстилка, древесина), Бк/м².

Индексом k обозначены различные компоненты древостоя: $k = 0$ – лесная подстилка, $k = 1$ – древесина, $k = 2$ – кора, $k = 3$ – ветви менее 1 см, $k = 4$ – хвоя и листья.

При низовых лесных пожарах сгорает только лесная подстилка и травостой ($A_{s_bio,j,k}^i = 0$ при $k > 0$).

При верховых лесных ($j = 1, 2$) пожарах сгорает лесная подстилка ($k = 0$) и все компоненты фитомассы древостоя ($k = 2-4$). Средняя приземная объемная активность i -го радионуклида в зоне дыхания участников пожаротушения в непосредственной близости от фронта огня [6] рассчитывается по формуле:

$$A_{v_{\text{верховой}}}^i = 10^{-5} \times \sum_{j=1}^2 \sum_{k=0}^4 A_{s_bio,j,k}^i, \quad (4)$$

где $A_{v_{\text{верховой}}}^i$ – объемная активность i -го радионуклида в зоне дыхания персонала при верховом пожаре, Бк/м³;

10^{-5} – эмпирический коэффициент, равный отношению средней приземной объемной активности радионуклида i к запасу в горячем материале на единицу поверхности, 1/м;

$A_{s_bio,j,k}^i$ – средняя удельная поверхностная активность i -го радионуклида в биомассе горящего лесного материала j (лесная подстилка, древесина), Бк/м².

Средняя удельная поверхностная активность i -го радионуклида в биомассе горящего лесного материала j (лесная подстилка, древесина) [6] рассчитывается по формуле:

$$A_{s_bio,j,k}^i = A_{m_bio,j,k}^i \times M_{j,k}, \quad (5)$$

где $A_{s_{bio,j,k}}$ – средняя удельная поверхностная активность i -го радионуклида в биомассе горящего лесного материала (лесная подстилка, древесина), Бк/м²;

$A_{m,bio,j,k}^i$ – удельная активность i -го радионуклида в структурных компонентах древостоя, Бк/кг;

$M_{j,k}$ – продуктивность j -го вида древесины, либо средняя масса лесной подстилки на единицу площади, кг/м².

Удельная активность i -го радионуклида в структурных компонентах древостоя [6] рассчитывается на основании плотности загрязнения почвы радионуклидом i :

$$A_{m,bio,j,k}^i = \sigma_i \times T f_{j,k}^i, \quad (6)$$

где $A_{m,bio,j,k}^i$ – удельная активность i -го радионуклида в структурных компонентах древостоя, Бк/кг;

σ_i – плотность загрязнения территории i -ым радионуклидом, кБк/м²;

$T f_{j,k}^i$ – коэффициент перехода радионуклидов из почвы в сухие k компоненты древостоя, (Бк/кг)/(кБк/м²).

Для оперативной оценки плотности загрязнения территории в случае лесных пожаров на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения допускается использовать карты радиоактивного загрязнения [13].

При необходимости учета активности i -го радионуклида в результате процесса ресуспензии (As_i) данный параметр может быть рассчитан по формуле:

$$As_i = k_i \times \sigma_i, \quad (7)$$

где As_i – объемная активность i -го радионуклида в результате ресуспензии, Бк/м³;

k_i – коэффициенты подъема (ресуспензии) i -го радионуклида, м⁻¹;

σ_i – плотность загрязнения территории i -ым радионуклидом, Бк/м².

Значения коэффициентов ресуспензии различных радионуклидов (k_i) на территориях с высокой плотностью загрязнения для случая верховых лесных пожаров на расстоянии порядка 300 м от кромки огня в зоне дыхания участников пожаротушения и в случае иных пожаров, когда участники пожаротушения находятся непосредственно у кромки огня (консервативные значения) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов ресуспензии для различных радионуклидов

Table 1

Resuspension coefficients for different radionuclides

Радионуклид	Коэффициент ресуспензии в 300 м от кромки огня, м ⁻¹	Консервативное значение коэффициента ресуспензии, м ⁻¹
Изотопы Pu	$1,3 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-6}$
²⁴¹ Am	$2,3 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-6}$
⁹⁰ Sr	$5,7 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$
¹³⁷ Cs	$2,7 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$

По результатам расчетов, выполненных авторами на основании экспериментов по сжиганию лесной подстилки из ПГРЭЗ, коэффициент ресуспензии для ¹³⁷Cs составил $3,2 \times 10^{-10} - 3,2 \times 10^{-9} \text{ м}^{-1}$.

Расчет ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения лица из населения от ингаляционного поступления радионуклидов ($E_{inh \text{ нас}}$) проводят по формуле:

$$E_{inh \text{ нас}} = \sum_{i=1}^S (e(g)_i \times Av_i) \times v \times t, \quad (8)$$

где $E_{inh \text{ нас}}$ – ожидаемая доза внутреннего облучения лица из населения от ингаляционного поступления радионуклидов, Зв;

$e(g)_i$ – дозовый коэффициент, равный ожидаемой эффективной дозе, обусловленной ингаляционным поступлением 1 Бк i -го радионуклида в организм в зависимости от возраста человека, с учетом процессов метаболизма радионуклида в организме, класса растворимости и размера частиц в радиоактивном аэрозоле, Зв/Бк;

Av_i – объемная активность i -го радионуклида в зоне дыхания населения, Бк/м³;

v – интенсивность ингаляции для различных возрастных групп населения, м³/ч;

t – продолжительность вдыхания загрязненного воздуха, ч.

Значения объемной активности радионуклидов A_v в населенных пунктах можно получить экспериментально (с использованием фильтровентиляционных установок) либо расчетным путем с помощью моделирования лицензионными программными кодами, предназначенными для оценки радиационной обстановки при радиационных авариях и рекомендованных международными организациями.

Испытание данного метода проведено на примере оценки ожидаемых эффективных доз ингаляционного облучения персонала при тушении низового пожара без применения СИЗ на участке ППРЭЗ в районе НП Крюки с высокой плотностью радиоактивного загрязнения: $^{238,239,240}\text{Pu} - 12 \times 10^3 \text{ Бк/м}^2$, $^{241}\text{Am} - 2,1 \times 10^4 \text{ Бк/м}^2$, $^{90}\text{Sr} - 9,2 \times 10^5 \text{ Бк/м}^2$, $^{137}\text{Cs} - 3 \times 10^6 \text{ Бк/м}^2$ [14], а также населения, проживающего в г. Мозырь за первые 24 ч с момента пожара.

Для населения ингаляционные дозы облучения оценивались только для ^{137}Cs , поскольку только данный радионуклид может вносить вклад в дозу облучения при переносе на дальние расстояния. Измеренное значение объемной активности ^{137}Cs в воздухе в г. Мозырь в результате пожара на участке ЧЗО со схожими значениями плотности загрязнения ($^{239}\text{Pu} - 9,1 \times 10^3 \text{ Бк/м}^2$, $^{241}\text{Am} - 2,6 \times 10^4 \text{ Бк/м}^2$, $^{90}\text{Sr} - 9,2 \times 10^5 \text{ Бк/м}^2$, $^{137}\text{Cs} - 3,7 \times 10^6 \text{ Бк/м}^2$) в результате пожара 08.08.2015 г. составило $1,9 \times 10^{-4} \text{ Бк/м}^3$ [10].

Для верификации вышеприведенного метода и оценки процесса переноса радионуклидов при пожарах, концентрации радионуклидов в приземном слое атмосферы, выпадений радионуклидов на почву, доз ингаляционного облучения персонала и населения использовался модуль JRODOS-Wildfire компьютерного кода Java-based Real Time On-line Decision Support System (JRODOS). Модуль JRODOS-Wildfire позволяет оценить перенос и осаждение перераспределенных радионуклидов с помощью модели переноса частиц Лагранжа LASAT⁵. Для оценки доз персонала и населения с помощью модуля JRODOS-Wildfire использовался сценарий пожара, произошедшего 08.08.2015 г. на территории ЧЗО общей площадью 50 км² [10].

С помощью модуля JRODOS-Wildfire⁶ также проведен расчет ингаляционной дозы облучения реального лица, работающего в ППРЭЗ, относящегося к категории персонал (лесника), многократно в течение 2019 г., задействованного в тушении пожаров на территории заповедника. Расчеты проводились для участка Тульговичского лесничества, вблизи г. Наровля, площадью 122 га, в тушении пожаров на котором лесник принимал участие. Представлены фактические даты пожаров на данном участке.

Ввиду отсутствия в санитарно-гигиенической характеристике условий работы данных о плотности загрязнения территории кварталов леса Тульговичского лесничества на территории ППРЭЗ в расчете были использованы последние опубликованные данные о плотности загрязнения радионуклидами (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , ^{239}Pu) территории ППРЭЗ по состоянию на 2009 г. [8]. Время облучения принято равным фактическому времени, затраченному на тушение пожаров. Ввиду отсутствия информации о защитных свойствах и времени использования лесником СИЗ для обеспечения консервативности расчетов было принято допущение, что работа выполнялась без использования СИЗ органов дыхания. Учтены реальные метеорологические условия, наблюдавшиеся на даты пожаров: 04.07.2019, 11.09.2019, 12.09.2019 (табл. 2).

Таблица 2

Описание условий пожаров для расчета ингаляционной дозы облучения лесника при тушении пожаров на территории ППРЭЗ

Table 5

Description of conditions for calculating the inhalation dose of a forester when extinguishing fires on the territory of the PSRER

Пожар	Дата пожара	Длительность пожара, ч	Плотность загрязнения, Бк/м ²	Направление ветра	Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С
Пожар 1	04.07.2019	8	$^{137}\text{Cs} - 1,3 \times 10^6$ $^{90}\text{Sr} - 3,0 \times 10^4$ $^{239}\text{Pu} - 2,5 \times 10^3$ $^{241}\text{Am} - 2,5 \times 10^3$	Южное	1	19
Пожар 2	11.09.2019	9,5		Южное	3	28
Пожар 3	12.09.2019	20,5		Западное	1	27

⁵Ievdin I, et al. JRodos User Guide. URL: https://resy5.iket.kit.edu/JRODOS/documents/JRodos_UserGuide.pdf. (date accessed: 03.06.2020).

⁶Там же.

Результаты исследования и их обсуждение

Учитывая, что в случае низового пожара горит только лесная подстилка, а плотность биомассы на данном участке ПГРЭС составляет 3,4 кг/м² [9], значения средней удельной поверхностной активности радионуклидов в биомассе горящего лесного материала (лесной подстилки) рассчитаны по формуле 6.

Значения объемной активности радионуклидов (A_{Vi}) в зоне дыхания участников пожаротушения при низовом пожаре, рассчитанные с использованием формулы 4, и значения ожидаемых ингаляционных доз облучения участников пожаротушения (персонала), рассчитанные с помощью формулы 1, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Уровни средней удельной поверхностной активности радионуклидов в горячей биомассе, объемной активности радионуклидов в зоне дыхания персонала и ингаляционные дозы облучения персонала, рассчитанные с помощью метода

Table 3

Levels of average specific surface activity concentration of radionuclides in the burning biomass, activity concentrations of radionuclides in the worker's breathing zone and inhalation doses to workers calculated using the method

Радионуклид	Средняя удельная поверхностная активность радионуклида ($A_{S_{bio,j,k}}$), Бк/м ²	Объемная активность (A_{Vi}), Бк/м ³	Доза ингаляционного облучения ($E_{inh\ перс}$), Зв
²³⁸ Pu	390	$0,39 \times 10^{-2}$	$2,8 \times 10^{-5}$
^{239,240} Pu	670	$0,67 \times 10^{-2}$	$5,07 \times 10^{-5}$
²⁴¹ Am	1590	$1,59 \times 10^{-2}$	$1,05 \times 10^{-4}$
⁹⁰ Sr	$37,6 \times 10^3$	0,38	$2,11 \times 10^{-6}$
¹³⁷ Cs	103×10^3	1,03	$1,70 \times 10^{-6}$

С учетом данных об уровнях объемной активности ¹³⁷Cs в воздухе в г. Мозырь в результате пожара 08.08.2015 г. [10] и с использованием формулы 9 была проведена оценка ожидаемых эффективных доз внутреннего облучения различных возрастных групп населения, проживающего в г. Мозырь, от ингаляционного поступления ($E_{inh\ нас}$), которые составили: для детей 7 лет – $3,0 \times 10^{-11}$ Зв, для детей 15 лет – $4,2 \times 10^{-11}$ Зв, для взрослых – $4,1 \times 10^{-11}$ Зв.

Для верификации полученных результатов оценки ингаляционных доз облучения персонала и населения вследствие пожаров на территории с высокими уровнями радиоактивного загрязнения проведено моделирование пожара на участке ПГРЭС с плотностью радиоактивного загрязнения радионуклидами в районе НП Крюки.

Результаты моделирования распространения радиоактивного облака при пожаре на рассматриваемом участке ЧЗО с помощью программного модуля JRODOS-Wildfire⁷ показали, что через 24 ч после начала пожара максимальное значение объемной активности в г. Мозырь (87 км от места пожара) составит $2,03 \times 10^{-3}$ Бк/м³, а доза облучения взрослого населения от ингаляции ¹³⁷Cs – $2,9 \times 10^{-8}$ Зв.

Результаты оценки ожидаемых ингаляционных доз облучения персонала для рассматриваемого участка ЧЗО с помощью программного модуля JRODOS-Wildfire⁸ приведены в табл. 4.

Таблица 4

Уровни объемной активности радионуклидов в зоне дыхания и ингаляционные дозы облучения персонала, рассчитанные с помощью программного модуля JRODOS-Wildfire

Table 4

Levels of activity concentrations of radionuclides in the breathing zone and inhalation doses of workers exposure, calculated using software module JRODOS-Wildfire

Радионуклид	Объемная активность (A_{Vi}), Бк/м ³	Доза ингаляционного облучения ($E_{inh\ перс}$), Зв
^{239,240} Pu	$1,0 \times 10^{-1}$	1×10^{-4}
²⁴¹ Am	$3,3 \times 10^{-1}$	$2,4 \times 10^{-4}$
⁹⁰ Sr	$2,4 \times 10^1$	$1,5 \times 10^{-5}$
¹³⁷ Cs	9,5	$7,5 \times 10^{-6}$

⁷Ievdin I, et al. JRodos User Guide. URL: https://resy5.iket.kit.edu/JRODOS/documents/JRodos_UserGuide.pdf. (date accessed: 03.06.2020).

⁸Там же.

Уровни объемной активности радионуклидов, рассчитанные с помощью метода на 1 порядок величины ниже, чем с помощью модуля JRODOS-Wildfire.

Для персонала ингаляционные дозы облучения от радионуклидов $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{90}Sr , рассчитанные с помощью метода, также на 1 порядок величины ниже, чем с помощью модуля JRODOS-Wildfire, а доза облучения от ^{137}Cs различается менее чем на порядок: суммарная ингаляционная доза для персонала, рассчитанная с помощью разработанного метода, составила $1,70 \times 10^{-6}$ Зв (или 0,0017 мЗв), при расчете с помощью модуля JRODOS-Wildfire – $7,5 \times 10^{-6}$ Зв (или 0,0075 мЗв).

Разница в полученных результатах между разработанным расчетным методом и методом моделирования с помощью модуля JRODOS-Wildfire объясняется использованием различных значений уровней ингаляции радионуклидов, используемых дозовых коэффициентах, а также неопределенностью в проведении оценок объемной активности радионуклидов при моделировании атмосферного переноса радионуклидов на дальние расстояния при пожарах.

В результате выполненных с помощью модуля JRODOS-Wildfire расчетов ингаляционных доз облучения лесника, многократно выполнявшего тушения пожаров в ПГРЭЗ в 2019 г., и при допущении отсутствия использования СИЗ органов дыхания при пожаре 1 за 8 ч работы по тушению пожара ингаляционная доза облучения составит порядка 1 мкЗв, при пожаре 2 за 9,5 ч работы – 2 мкЗв, при пожаре 3 за 20,5 ч работы – 4 мкЗв (табл. 5).

Таблица 5

Ингаляционные дозы облучения лесника ПГРЭЗ при лесных пожарах 2019 г.

Table 5

Inhalation exposure doses of a forester PGRER during forest fires in 2019

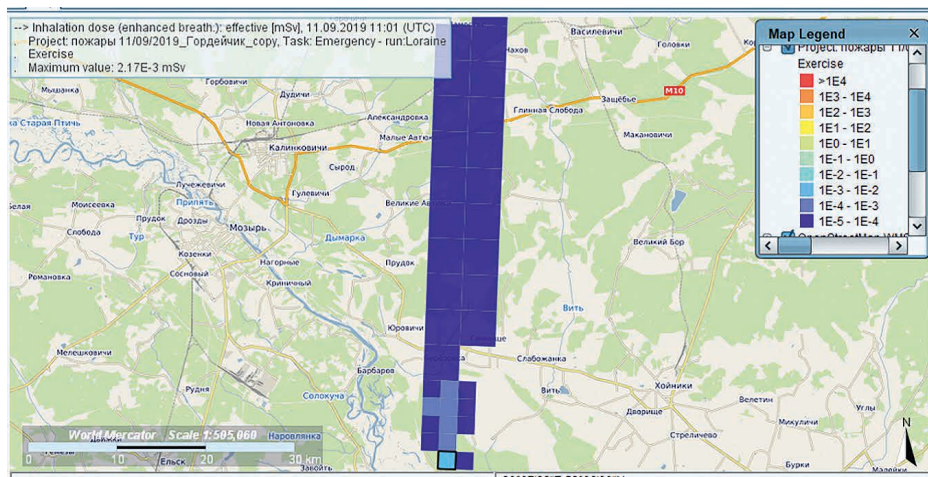
Пожар	Ингаляционная доза облучения лесника, мкЗв				
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{239}Pu	^{241}Am	Суммарная
Пожар 1	$2,0 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-1}$	$4,5 \times 10^{-1}$	1,0
Пожар 2	$8,7 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$9,3 \times 10^{-2}$	2,2
Пожар 3	$2,2 \times 10^{-1}$	$3,8 \times 10^{-2}$	2,2	1,8	4,3

Суммарная ингаляционная доза облучения лица из персонала за 38 ч тушения пожаров в году (суммарно) на территории ПГРЭЗ в Тульговичском лесничестве при работе без использования СИЗ органов дыхания составит порядка 7,5 мкЗв/год (рисунок).

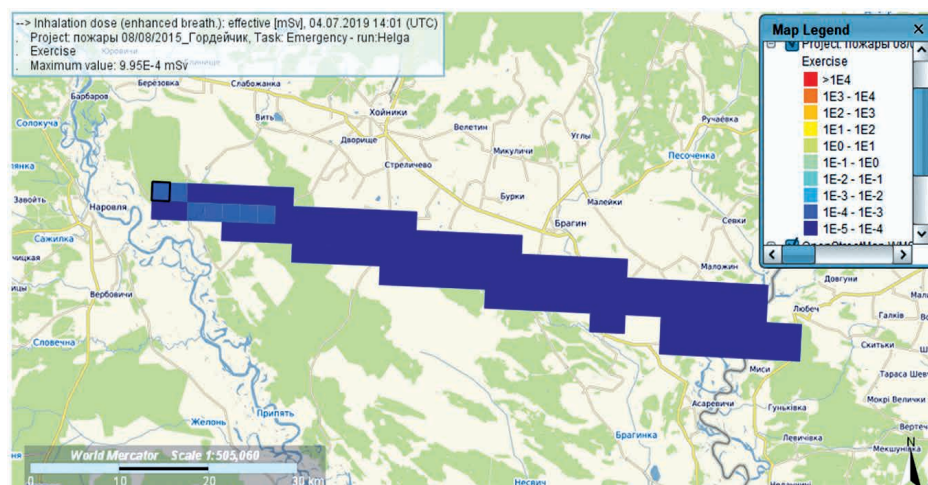
Для населения ингаляционная доза облучения ^{137}Cs при расчете с помощью модуля JRODOS-Wildfire на 3 порядка выше значения, полученного расчетным методом: ингаляционная доза взрослого населения, рассчитанная с помощью модуля JRODOS-Wildfire, составила $1,9 \times 10^{-8}$ Зв, а рассчитанная с помощью метода – $4,1 \times 10^{-11}$ Зв. Данные различия объясняются использованием различных значений уровней ингаляции радионуклидов, а также незначительными различиями в используемых дозовых коэффициентах $e(g)_i$. Кроме того, разница в полученных результатах объясняется неопределенностью в проведении оценок объемной активности радионуклидов при моделировании атмосферного переноса радионуклидов при пожарах (уровни объемной активности ^{137}Cs в атмосферном воздухе для г. Мозырь составили $2,03 \times 10^{-3}$ Бк/м³ при моделировании с помощью модуля JRODOS-Wildfire, а фактически измеренное значение – $1,9 \times 10^{-4}$ Бк/м³).

Результаты оценки ингаляционных доз облучения персонала и населения, выполненные с помощью разработанного метода и с помощью программного модуля JRODOS-Wildfire, показывают достаточно хорошую сходимость результатов.

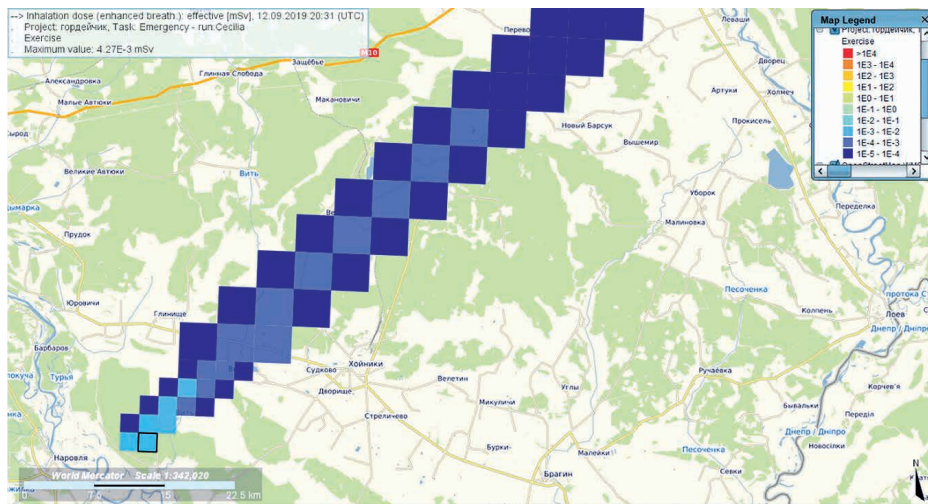
a/a



b/b



c/c



Ингаляционные дозы облучения персонала при тушении пожаров в ППРЭЗ: 04.07.2019 (a), 11.09.2019 (б) и 12.09.2019 (в), рассчитанные JRODOS-Wildfire, мЗв

Inhalation exposure dose of worker for 8 hours of work to extinguish a fire in PGRER on 04.07.2019 (a), 11.09.2019 (b) and 12.09.2019 (c), calculated with JRODOS-Wildfire mSv

Заключение

Впервые в Республике Беларусь разработан метод оценки доз облучения для участников пожаротушения и населения в результате ингаляционного поступления радионуклидов при чрезвычайных ситуациях (лесных пожарах) на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения. Метод включает в себя алгоритм проведения расчета доз, оценку уровней объемной активности радионуклидов при верховых и низовых пожарах, рекомендуемые значения коэффициентов ресуспензии для ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и изотопов плутония, значения интенсивности ингаляции для персонала и различных возрастных групп населения, а также коэффициенты перехода к дозе на единицу ингаляционного поступления для различных возрастных групп.

Применение разработанного метода позволит:

- оценивать объемную активность радионуклидов в воздухе при лесных пожарах;
- рассчитывать ожидаемые эффективные дозы облучения персонала в результате ингаляционного поступления радионуклидов при тушении лесных пожаров на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения;
- определить ожидаемые эффективные дозы облучения населения от ингаляционного поступления радионуклидов при лесных пожарах на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

Проведенная оценка доз ингаляционного облучения персонала и населения для сценария низового пожара в ЧЗО с плотностью загрязнения территории радионуклидами ^{137}Cs – $3,0\text{--}3,7 \times 10^6$ Бк/м², ^{90}Sr – $9,2 \times 10^5$ Бк/м², ^{239}Pu – $9,1\text{--}12 \times 10^3$ Бк/м², ^{241}Am – $2,1\text{--}2,6 \times 10^4$ Бк/м² показала, что расчетные значения объемной активности радионуклидов на месте пожара в зоне дыхания персонала с помощью метода составили для ^{238}Pu – $0,39 \times 10^{-2}$ Бк/м³, $^{239,240}\text{Pu}$ – $0,67 \times 10^{-2}$ Бк/м³, ^{241}Am – $1,59 \times 10^{-2}$ Бк/м³, для ^{90}Sr – $0,38$ Бк/м³, ^{137}Cs – $1,03$ Бк/м³, а с помощью модуля JRODOS-Wildfire – $1,0 \times 10^{-1}$ Бк/м³ для $^{239,240}\text{Pu}$, $3,3 \times 10^{-1}$ Бк/м³ для ^{241}Am , $2,4 \times 10^1$ Бк/м³ для ^{90}Sr и $9,5$ Бк/м³ для ^{137}Cs . Полученные значения ожидаемых ингаляционных доз облучения персонала ($0,0017$ мЗв с помощью разработанного метода и $0,0075$ мЗв с помощью модуля JRODOS-Wildfire) и взрослого населения г. Мозырь ($4,1 \times 10^{-11}$ Зв с помощью разработанного метода и $2,9 \times 10^{-8}$ Зв с помощью модуля JRODOS-Wildfire) согласуются с результатами ранее проведенных оценок [11] и свидетельствуют об отсутствии необходимости применения защитных мер как для персонала, так и для населения, поскольку не превышают установленных пределов доз облучения – 5 мЗв и 1 мЗв соответственно.

В результате расчета ингаляционной дозы облучения лесника ППРЭЗ, отнесенного к категории «персонал» и участвующего в пожаротушениях в течение 38 ч за календарный год, установлено, что без применения СИЗ органов дыхания доза облучения составит $7,5$ мкЗв/год, что на три порядка ниже установленной дозы облучения для ограничения облучения работников, отнесенных к категории «персонал» и выполняющих работы в зонах радиоактивного загрязнения – 5 мЗв/год.

Несмотря на отсутствие превышений установленных нормативов, для контроля и учета доз облучения персонала, выполняющего работы в зонах радиоактивного загрязнения, необходимо организовать: радиометрический контроль загрязненности кожных покровов, СИЗ, в том числе спецодежды; контроль дозы внешнего гамма-излучения с использованием индивидуальных дозиметров; измерение объемной активности радионуклидов во вдыхаемом воздухе; регистрацию индивидуальных доз облучения персонала проводить в порядке, установленным законодательством.

Обработка и передача информации об индивидуальных дозах облучения персонала должна осуществляться в соответствии с требованиями Положения о порядке учета доз облучения, полученных населением и персоналом, утвержденного постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 27 ноября 2020 г. № 110.

Библиографические ссылки

1. Богодяж ЕП, редактор. *Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений за 2018 год*. Минск: [б. и.]; 2019. 476 с.
2. *30 лет чернобыльской аварии: итоги и перспективы преодоления ее последствий*. Национальный доклад. Минск: Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь; 2016. 116 с.
3. Hao WM, Bondarenko OO, Zibtsev S, Hutton D. Vegetation fires, smoke emissions, and dispersion of radionuclides in the Chernobyl Exclusion Zone. *Development Environmental Science*. 2009;8:265–275.
4. Yoschenko VI, Kashparov VA, Protsak VP, et al. Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone. Part I. Fire experiments. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;86:143–163.
5. Dvornik AA, Korol RA, Shamal NV, et al. Potential threat to human health during forest fires in the Belarusian exclusion zone. *Aerosol Science and Technology*. 2018;52(8):923–932.
6. Кашпаров ВА, Журба МА, Киреев СИ, и др. Оценка ожидаемых доз облучения участников пожаротушения в чернобыльской зоне отчуждения в апреле 2015 г. *Ядерная физика та енергетика (Україна)*. 2015;16(4):399–407.

7. Generic Procedures for Assessment and Response during a Radiological Emergency. IAEA-TECDOC-1162. International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA; 2002. 186 p.
8. Израэль ЮА, Богдевич ИМ, редакторы. *Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси*. Москва; Минск: [б. и.]; 2009. 140 с.
9. Dvornik AA, Korol RA, Shamal NV, et al. Potential threat to human health during forest fires in the Belarusian exclusion zone. *Aerosol Science and Technology*. 2018;52(8):923–932.
10. Герменчук МГ, и др. *Радиационный мониторинг. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений 2015*. Минск: Бел НИЦ «Экология», 2016. с. 298–305.
11. Кляус ВВ, Жукова ОМ, Гусейнова ДИ. Разработка метода оценки доз облучения персонала и населения в результате ингаляционного поступления радионуклидов при пожарах на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения. В: Сычик СИ, главный редактор. *Здоровье и окружающая среда. Сборник научных трудов*. Минск: [б. и.]; 2021. с. 49–57.

References

1. Bogodyazh EP, editor. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchei sredy Respubliki Belarus': rezul'taty nablyudeniya 2018 god* [National environmental monitoring system of the Republic of Belarus: results of observations 2018]. Minsk: [publisher unknown]; 2019. 476 p. Russian.
2. *30 let chernobyl'skoi avarii: itogi i perspektivy preodoleniya ee posledstviya* [30 years of the Chernobyl accident: results and prospects for overcoming its consequences. National report]. Minsk: Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus; 2016. 116 p. Russian.
3. Hao WM, Bondarenko OO, Zibtsev S, Hutton D. Vegetation fires, smoke emissions, and dispersion of radionuclides in the Chernobyl Exclusion Zone. *Development Environmental Science*. 2009;8:265–275.
4. Yoschenko VI, Kashparov VA, Protsak VP, et al. Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone. Part I. Fire experiments. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;86:143–163.
5. Dvornik AA, Korol RA, Shamal NV, et al. Potential threat to human health during forest fires in the Belarusian exclusion zone. *Aerosol Science and Technology*. 2018;52(8):923–932.
5. Kashparov VA, Zhurba MA, Kireev SI, et al. *Otsenka ozhidaemykh doz oblucheniya uchastnikov pozharotusheniya v chernobyl'skoi zone otchuzhdeniya v aprele 2015 g.* [Estimation of the expected exposure doses to fire extinguishing participants in the Chernobyl exclusion zone in April 2015]. *Nuclear Physics and Energy (Ukraine)*. 2015;16(4):399–407. Russian.
6. Generic Procedures for Assessment and Response during a Radiological Emergency. IAEA-TECDOC-1162. International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA; 2002. 186 p.
7. Израэль ЮА, Богдевич ИМ. *Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси* [Atlas of modern and predictive aspects of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in the affected territories of Russia and Belarus]. Moscow; Минск: [publisher unknown]; 2009. 140 p. Russian.
8. Dvornik AA, Korol RA, Shamal NV, et al. Potential threat to human health during forest fires in the Belarusian exclusion zone. *Aerosol Science and Technology*. 2018;52(8):923–932.
9. Герменчук МГ, и др. *Радиационный мониторинг. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений 2015* [Radiation monitoring. National environmental monitoring system of the Republic of Belarus: results of observations 2015]. Минск: БелНИЦ «Экология»; 2016. с. 298–305. Russian.
10. Кляус ВВ, Жукова ОМ, Гусейнова ДИ. Development of a method for assessing exposure doses to workers and the public as a result of inhalation intake of radionuclides during fires in areas with a high level of radioactive contamination. In: Сычик СИ, chief editor. *Zdorov'ye i okruzhayushchaya sreda. Sbornik nauchnykh trudov* [Health and Environment]. Минск: [publisher unknown]; 2021. с. 49–57. Russian.

Статья поступила в редакцию 22.09.2022.
Received by editorial board 22.09.2022.

УДК 616-018-006-085:539.3:534.1[-097:616.155.392.8-036.12

ПОЛИМОРФИЗМ ГЕНОВ *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1*, *GSTT1* И ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТЬ К РАЗВИТИЮ ОСТРОГО ЛЕЙКОЗА У ДЕТЕЙ

Т. В. САВИЦКАЯ^{1), 2)}

¹⁾Республиканский научно-практический центр детской онкологии, гематологии и иммунологии,
ул. Фрунзенская, 43, 223053, Боровляны, Минский район, Беларусь

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

Роль генетического полиморфизма в развитии онкологических заболеваний находится на стадии активного изучения, но уже сегодня накопленные данные свидетельствуют о его значимости в медицине. Исследования в этой области позволят не только лучше понять механизмы канцерогенеза, но и выявлять группы риска для каждой нозологии, мониторировать эти группы для раннего выявления онкологических заболеваний.

При поиске генетических маркеров онко-гематологических заболеваний исследовали аллеломорфы генов, участвующих в системах биотрансформации ксенобиотиков. В работе использованы молекулярно-генетические методы: полимеразной цепной реакции и рестрикционного анализа.

В результате исследования впервые определены частоты встречаемости генотипов *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1*, *GSTT1* у белорусских детей. При анализе ассоциаций полиморфных вариантов гена *MDR1* C3435T с риском развития острого лейкоза (ОЛ) установлено, что гетерозиготные индивидуумы с аллелем «дикого» типа *MDR1* C3435T характеризуются сниженным риском развития ОЛ, а гомозиготные носители 2 мутантных аллелей *MDR1* T3435T имеют значительный риск развития как острого лимфобластного (ОЛЛ), так и острого миелобластного лейкоза (ОМЛ) ($p = 0,01$ и $p = 0,02$, соответственно).

При анализе ассоциаций полиморфных вариантов гена *GSTT1* обнаружено, что у детей с «не 0» генотипом почти в 6 раз повышен риск развития ОЛ по сравнению с пациентами с «0» генотипом, и значительно выше именно в отношении риска развития ОМЛ ($p = 0,003$).

Образец цитирования:

Савицкая Т.В. Полиморфизм генов *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1*, *GSTT1* и предрасположенность к развитию острого лейкоза у детей. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2023;2:68–77.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-68-77>

For citation:

Savitskaya TV. Polymorphism of *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1*, *GSTT1* genes and predisposition to development of childhood acute leukemia. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2023;2:68–77. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-68-77>

Автор:

Татьяна Владимировна Савицкая – кандидат биологических наук; врач лабораторной диагностики¹⁾; старший преподаватель кафедры иммунологии²⁾.

Author:

Tatsiana V. Savitskaya, PhD (biology); scientist in the clinical diagnostic laboratory^a; senior lecturer at the department of immunology^b.
more_mensk@mail.ru

Не выявлено статистически значимых ассоциаций полиморфизмов *MDR1* G2677T, *MTHFR* C677T и *GSTM1* с риском развития острого лейкоза, что свидетельствует о том, что ни один из этих изученных генотипов не является фактором предрасположенности к этому заболеванию. Как показали результаты собственного исследования, генетический полиморфизм может быть важным фактором, определяющим предрасположенность к острым лейкозам. Кроме этого, дальнейшее изучение полиморфизма генов и связей с их различными заболеваниями позволит охарактеризовать генетические особенности, характерные для белорусской популяции.

Ключевые слова: генетический полиморфизм; ксенобиотики; дети; острый лейкоз.

POLYMORPHISM OF *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1*, *GSTT1* GENES AND PREDISPOSITION TO DEVELOPMENT OF CHILDHOOD ACUTE LEUKEMIA

T. V. SAVITSKAYA^{a, b}

^aRepublic Center of Pediatric Oncology, Hematology and Immunology
43 Frunzenskaja Street, Borovlyany 223053, Minsk district, Belarus

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

The role of genetic polymorphisms in the development of cancer is still under active study, but already today accumulated data show its importance in medicine. Research in this area will not only help to better understand the mechanisms of carcinogenesis, but also to identify risk groups for each nosology and to monitor these groups for early detection of cancer.

When searching for genetic markers of oncohematological diseases, polymorphisms of genes involved in xenobiotic biotransformation systems were investigated. Molecular genetic methods were used: polymerase chain reaction and restriction analysis.

The study identifies for the first time the frequencies of *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1*, *GSTT1* genotypes in Belarusian children. Analysis of associations of polymorphic variants of *MDR1* C3435T gene with the risk of acute leukemia revealed that heterozygous individuals with the «wild-type» *MDR1* C3435T allele have a reduced risk of acute leukemia development, while homozygous carriers of 2 mutant *MDR1* T3435T alleles have a significant risk for both acute lymphoblastic leukemia (ALL) and acute myeloblastic leukemia (AML) ($p = 0.01$ and $p = 0.02$, respectively).

Analysis of associations of *GSTT1* gene polymorphic variants revealed that children with the «not 0» genotype had an almost 6-fold increased risk of acute leukemia compared to patients with the «0» genotype, and a significantly higher risk of AML ($p = 0.003$).

No statistically significant associations of *MDR1* G2677T, *MTHFR* C677T, and *GSTM1* polymorphisms with the risk of acute leukemia were found, indicating that none of these genotypes studied was a predisposition factor for this disease. Our research has shown the importance of genetic polymorphism as a factor determining susceptibility to acute leukemia. Further study of gene polymorphism and its association with various diseases will make it possible to characterize genetic features characteristic of the Belarusian population.

Keywords: genetic polymorphism; xenobiotics; children; acute leukemia..

Введение

Значительный рост количества онкологических заболеваний в последние десятилетия, кроме ряда причин, связан также с всевозрастающим загрязнением окружающей среды чужеродными для организма веществами (ксенобиотиками) и, как следствие, увеличением их поступления в организм человека. Разная предрасположенность к заболеванию у человека может быть обусловлена генетическими факторами, в том числе индивидуальными различиями в биотрансформации ксенобиотиков, включая канцерогены, и выведении их из организма. Установление взаимосвязи между определенным генотипом и типом заболевания позволяет приблизить нас к пониманию механизмов развития различных форм рака, а также выявлять группы риска, обладающие повышенной чувствительностью к развитию данной патологии [1]. Одним из основных свойств ферментов биотрансформации ксенобиотиков является генетический полиморфизм, что предполагает их различную активность в метаболизме субстратов и обуславливает индивидуальную чувствительность как к химическим соединениям, так и эндогенным веществам [2].

Острый лейкоз (ОЛ) представляет собой гетерогенную группу злокачественных заболеваний гемопозитической ткани, при котором повреждения (мутации) в генетическом материале кроветворной клетки-предшественницы приводят к потере ее способности к нормальной дифференцировке и избыточной пролиферации потомков ее клона. Мутантный клон достаточно быстро вытесняет нормальные кроветворные клетки, замещая собой весь гемопоэз. ОЛ составляют 30–35 % онкологических заболеваний

детского возраста, из них на долю острого лимфобластного лейкоза (ОЛЛ) приходится 80 %, острого миелобластного (ОМЛ) – 15–17 %. ОМЛ отличается чрезвычайно тяжелым и агрессивным течением. Эффективность лечения детей с ОМЛ значительно ниже, чем детей с ОЛЛ [3]. Поэтому особый интерес у специалистов, занимающихся изучением патогенеза и терапией лейкозов, вызывают гены, участвующие в метаболизме и распределении ксенобиотиков (ферменты первой и второй фазы биотрансформации ксенобиотиков), а также АТФ-зависимых транспортных белков.

Одним из наиболее изученных белков, физиологическая роль которого заключается в защите клеток от токсических соединений, является АТФ-зависимый транспортный Р-гликопротеин – продукт гена *MDR1* (Multidrug Resistance 1), который осуществляет транспорт веществ из клетки. Показано, что у пациентов с рецидивами лейкозов экспрессия Р-гликопротеина повышена, что свидетельствует либо о селекции Р-гликопротеин положительных опухолевых blastов, либо указывает на положительный регуляторный эффект препаратов, используемых в терапии лейкозов. Механизм, с помощью которого изменяется экспрессия белка, пока полностью неясен, но отмечается, что значимую роль в нем может играть генетический полиморфизм *MDR1* – наличие множественных аллелей гена [4; 5].

Лейкозы возникают как результат транслокаций, делеций или инверсий в генах регулирующих развитие клеток крови или гомеостаз. Дефицит фолиевой кислоты в организме приводит к нарушению механизма репарации ДНК, что увеличивает риск возникновения хромосомных нарушений. Фермент метилентетрагидрофолатредуктаза (methylenetetrahydrofolate reductase, *MTHFR*) является одним из ключевых ферментов внутриклеточного метаболизма фолата [6; 7]. Полиморфизм гена *MTHFR* C677T ассоциируется со снижением активности фермента и нарушением распределения метаболитов фолиевой кислоты. В ряде публикаций отмечается связь между полиморфизмом *MTHFR* и риском развития лейкемии. Кроме этого, у носителей двух мутантных аллелей Т (гомозиготное состояние) высок риск развития побочных эффектов при приеме некоторых лекарственных препаратов, используемых в противоопухолевой химиотерапии [6–8].

Согласно современным данным, в организме биотрансформация ксенобиотиков происходит в несколько этапов. Основу первого этапа составляют реакции окисления, восстановления и гидролиза молекул ксенобиотика монооксигеназной системой. Второй этап, осуществляемый ферментами второй фазы биотрансформации (глутатион-, ацетил-, сульфо-, метилтрансферазы и др.), – конъюгация, восстановление или гидролиз промежуточных метаболитов ксенобиотиков. Продукты конъюгации подвергаются экскреции почками, кишечником, легкими и кожей. Среди ферментов второй фазы биотрансформации наиболее распространенными являются белки суперсемейства глутатион-S-трансфераз (glutathione S-transferases, *GST*). Это семейство катализирует конъюгацию восстановленного глутатиона с множеством электрофильных субстратов, участвует в метаболизме простагландинов, лейкотриенов, транспорте стероидных гормонов, играет важную роль в защите клетки от продуктов перекисного окисления [9].

GST-гены человека образуют 4 больших суперсемейства: *GSTα*, *GSTμ* или *M*, *GSTθ* или *T* и *GSTρ*. Некоторые из них характеризуются значительным популяционным полиморфизмом и, как показывают исследования, определенные аллели могут играть предрасполагающую роль в процессах канцерогенеза. Два семейства *GSTM* и *GSTT* проявляют генетический полиморфизм как делецию генов (*GSTM1* и *GSTT1*) и при гомозиготной наследственной делеции, «нулевых генотипах», наблюдается фенотипическое отсутствие энзимной активности соответствующего белка. [2; 9; 10]. Известно, что при «нулевых генотипах» *GST* (*GSTM1* «0» и *GSTT1* «0») снижается активность глутатион – опосредованной биотрансформации ксенобиотиков. Так, *Takanashi, et al.* [11] отмечают, что двойной нулевой генотип является фактором прогноза раннего рецидива у детей с В-линейным ОЛЛ. В тоже время, по данным *Rocha, et al.* [12], дети с ОЛЛ группы высокого риска с «не ноль» *GSTM1* генотипом имели больший риск гематологического рецидива.

Таким образом, использование методов фармакогенетики для прогноза и терапии острых лейкозов становится необходимым условием прогресса в области изучения и лечения онкологических заболеваний.

Цель исследования – изучение частоты наиболее часто встречающихся полиморфных вариантов генов *MDR1*: G2677T и C3435T, *MTHFR* C677T, делеции *GSTM1* и *GSTT1*, а также попытаться оценить их влияние на предрасположенность к возникновению острых лейкозов у детей.

Материалы и методы исследования

Определение полиморфных вариантов было проведено у 103 детей, в том числе у 40 пациентов с острым лимфобластным лейкозом (ОЛЛ), у 32 – с острым миелобластным лейкозом (ОМЛ) и у 31 – группы сравнения (ГС). Группу сравнения (ГС) составили 31 здоровый ребенок, которые проходили диспансерное обследование в центре и не имели злокачественных новообразований.

Возраст обследуемых в группе с ОЛЛ на момент постановки диагноза составлял от 1 года до 22 лет (медиана – 7 лет); в группе с ОМЛ от 0 до 17 лет (медиана – 11 лет); в группе сравнения – 0–20 лет (медиана – 7 лет).

Распределение по полу: в группе с ОЛЛ мальчиков было 27 (67,5 %) человек, девочек – 13 (32,5 %); в группе с ОМЛ мальчики и девочки распределились поровну – по 16 (50,0 %) человек. В группе сравнения мальчиков было 18 (58,1 %), девочек – 13 (41,9 %).

Материалом для исследования служила ДНК пациентов, выделенная из лейкоцитарных клеток периферической крови. Выделение ДНК осуществляли методом экстракции фенол-хлороформной смесью по общепринятой методике [14]. Качество и количество ДНК оценивали спектрофотометрически по соотношению длин волн 260 нм/280 нм.

Основным методом генотипирования полиморфизмов генов *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1*, *GSTT1* был метод полимеразной цепной реакции (ПЦР). Для генотипирования *MDR1* C3435T и G2677T применяли метод аллель-специфичной ПЦР в режиме реального времени с красителем SYBR Green I согласно методике [14].

Для диагностики полиморфизмов гена *MTHFR* C677T использовали метод RFLP (restriction fragment length polymorphism; полиморфизм длин рестрикционных фрагментов) принцип которого заключается в ПЦР-амплификации интересующего фрагмента ДНК и его последующем расщеплении соответствующей рестриктазой [15].

Два семейства *GSTM* и *GSTT* проявляют генетический полиморфизм как делецию генов (*GSTM1* и *GSTT1*). Эти делеции определяли методом ПЦР согласно методике [16].

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета прикладных статистических программ *Statistica 8.0*. Значимость различий в частотах встречаемости изучаемых признаков между анализируемыми группами оценивали по двухстороннему точному критерию Фишера. Об ассоциации генотипов с лимфопролиферативными заболеваниями судили по величине отношения шансов (ОШ) с 95 % доверительным интервалом (ДИ).

Результаты исследований и их обсуждение

Распределение генотипов *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1* и *GSTT1* у детей с острыми лейкозами и группе сравнения. Анализ распределения частоты изучаемых генотипов показал, что изучаемые генотипы *MDR1* 2677 и *MTHFR* 677 не имеют статистически значимых различий между группами пациентов с лейкозами и группой сравнения (табл. 1, 2).

В то же время анализ распределения полиморфных вариантов гена *MDR1* C3435T выявил статистически значимые различия в исследуемых группах. Генотип ТТ встречался среди детей с ОЛЛ ($p = 0,008$) и ОМЛ ($p = 0,02$), однако отсутствовал в группе сравнения. При этом в группе сравнения значительно преобладало гетерозиготное носительство *MDR1* C3435T, что статистически значимо отличало ее от групп с ОЛЛ ($p = 0,009$) и ОМЛ ($p = 0,02$).

Таблица 1

Частота распределения генотипов полиморфных вариантов генов *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1* и *GSTT1* между обследованными группами

Table 1

Frequency of *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1* and *GSTT1* genetic polymorphisms distributions between groups

Группы	n	Генотипы <i>MDR1</i> 2677			Генотипы <i>MDR1</i> 3435		
		GG n(%)	ТТ n(%)	GT n(%)	CC n(%)	ТТ n(%)	СТ n(%)
ОЛЛ	40	20 (50,0)	10 (25,5)	10 (25,5)	9 (22,5)	8* (20,0)	23 [§] (57,5)
ОМЛ	30	15 (50,0)	6 (20,0)	9 (30,0)	7 (23,3)	5** 16,7)	18 ^{§§} (60,0)
ГС	31	14 (45,2)	10 (32,3)	7 (22,5)	4 (12,9)	0***	27 ^{§§§} (87,1)
Всего	101	49 (48,6)	26 (25,7)	26 (25,7)	20 (19,8)	13 (12,9)	68(67,3)

Примечание. * ** – различия достоверны между группами $p = 0,008$ и $p = 0,02$, соответственно; [§], ^{§§} – различия достоверны между группами $p = 0,009$ и $p = 0,02$ соответственно.

Таблица 2

Частота распределения генотипов полиморфных вариантов генов *MTHFR* между обследованными группами

Table 2

Frequency of *MTHFR* genetic polymorphisms distributions between groups

Группы	n	Генотипы <i>MTHFR</i> 677		
		CC n(%)	TT n(%)	CT n(%)
ОЛЛ	40	20 (50,0)	5 (12,5)	15 (37,5)
ОМЛ	30	17 (56,7)	2 (6,7)	11 (36,6)
ГС	31	9 (40,9)	3 (13,6)	10 (45,5)
Всего	101	46 (50,0)	10 (10,9)	36 (39,1)

Примечание. Между всеми группами $p > 0,05$.

Последние годы изучение полиморфного варианта *MDR1* C3435T ведется очень интенсивно из-за его возможного влияния на экспрессию гена и вероятной возможной роли в патогенезе ряда заболеваний, включая онкогематологические [4]. Так, Амромина и др. [9] показали, что в группе из 200 пациентов с ОМЛ распространенность генотипов с мутантной аллелью была выше (СТ – 46,5 % и ТТ – 18,0 %), чем частота дикого генотипа СС – 35,5 %. Однако Rocha, et al. [12] не выявили значимых различий между частотами генотипов *MDR1* у детей с ОЛЛ и контрольной группой. Авторы вышеупомянутого исследования NCCLC также не выявили достоверных ассоциаций изучаемых генотипов *MDR1* в группах детей с ОЛЛ по сравнению с контрольными выборками. Тем не менее, авторы упоминают исследование «случай – контроль», проведенное польскими учеными, в котором было показано, что риск развития ОЛЛ у детей был ассоциирован с генотипом Т3435Т [17]. Эти данные подтверждают японские исследователи, которые при обследовании детей с ОЛЛ показали, что частота генотипа с аллелями Т3435Т была значительно выше у пациентов с лейкозом, чем в контрольной группе ($p = 0,006$) [18].

Что касается распространенности вариантов гена *MTHFR* С677Т, то в наших исследованиях (СС – 50,0 %, ТТ – 10,9 %, СТ – 39,1 %) она была наиболее близкой к распространенности в странах Северной Европы – Швеции, Ирландии [19]. В группе с ОЛЛ частота генотипа (ТТ – 12,5 %) была близка к частоте (11,5 %) в такой же группе пациентов, описываемых Krajcinovic с соавт. [8].

Результаты распределения частот аллелей генов *GSTM1* и *GSTT1* в обследуемых группах представлены в табл. 3.

Таблица 3

Распределение генотипов *GSTM1* и *GSTT1* в обследуемых группах

Table 3

Frequency of *GSTM1* and *GSTT1* genetic polymorphisms distributions between groups

Группы	n	<i>GSTM1</i> n (%)		<i>GSTT1</i> n (%)		Генотип <i>GSTM1/GSTT1</i> n (%)	
		«не 0»	«0»	«не 0»	«0»	«0/0»	«не0/не0»
ОЛЛ	40	26 (65,0)	14 (35,0)	36 (90,0)	4 (10,0)	1 (2,5)	23 (57,5)
ОМЛ	32	20 (62,5)	12 (37,5)	32 (100)	0*	0	20 (62,5)
ГС	27	19 (70,4)	8 (29,6)	20 (74,1)	7* (25,9)	4(14,8)	16 (59,3)
Всего	99	65 (64,4)	34 (33,4)	88 (88,9)	11 (11,1)	5 (5,1)	59 (94,9)

Примечание. * – различия достоверны между группами, $p = 0,003$.

Согласно полученным данным, у обследуемых детей не нулевые генотипы *GSTM1* и *GSTT1* встречаются чаще (64,4 % для *GSTM1* и 88,8 % для *GSTT1*), чем «нулевые». Известно, что нулевые аллели генов *GSTM1* и *GSTT1* достаточно широко распространены в популяциях. Так, у европейцев частота гомозигот по «ноль» аллелям *GSTM1* составляет – 40–60 %, а *GSTT1* – 10–20 % [20–22]. В наших исследованиях частота гомозигот по «ноль» генотипу *GSTM1* во всех обследуемых группах составила 33,4 %, а «ноль» генотипа *GSTT1* – 11,1 %.

В обследуемых группах частоты генотипов *GSTM1* были близки и статистически значимо не различались ($p > 0,05$). Однако при анализе частот генотипов *GSTT1* выявлено значимое различие между пациентами с ОМЛ и группой сравнения. «Ноль» генотип *GSTT1* достоверно чаще встречался в группе

сравнения, чем в группе с ОМЛ ($p = 0,003$) и чаще, чем в группе с ОЛЛ ($p > 0,05$). Исследования Alves, et al. [23], проведенные среди португальских детей со злокачественными новообразованиями, продемонстрировали увеличение частоты не «ноль» аллелей *GSTM1* и *GSTT1* среди пациентов с ОЛЛ, глиальными опухолями мозга и остеосаркомой. При этом результаты, полученные у детей с ОЛЛ, показали увеличение среди них частоты именно «не ноль» аллелей *GSTT1*. Аналогичные результаты получены группой американских ученых [22].

При анализе распределения полиморфизмов генов между группами мальчиков и девочек, не выявлено различий в частотах изучаемых генотипов, кроме группы сравнения, в которой у девочек преобладало гомозиготное носительство *MDR1* G2677G ($p = 0,004$), а у мальчиков преобладало гомозиготное носительство по мутантному типу – *MDR1* T2677T ($p = 0,02$). Анализ литературы показал, что авторы большинства исследований отмечают отсутствие связи между полами и изучаемыми нами генотипами [12; 17; 18].

Роль полиморфизмов генов *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1* и *GSTT1* в предрасположенности к острым лейкозам. Результаты изучения ассоциаций исследуемых генотипов с развитием ОЛ представлены в табл. 4.

Таблица 4

Ассоциация полиморфизмов генов *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1* и *GSTT1* с предрасположенностью к острым лейкозам

Table 4

Association of *MDR1*, *MTHFR*, *GSTM1* and *GSTT1* polymorphisms with acute leukemia susceptibility

Гено-тип	N		Общая группа ОЛ		ОЛЛ			ОМЛ		
	<i>n</i>	<i>n</i>	ОИП (95 % ДИ)	<i>p</i>	<i>n</i>	ОИП (95 % ДИ)	<i>p</i>	<i>n</i>	ОИП (95 % ДИ)	<i>p</i>
<i>MDR1</i> G2677T										
GT	7	19	1,28 (0,60–2,59)	0,81	10	1,14 (0,33–4,10)	1,0	9	1,47 (0,40–5,51)	0,57
TT	10	15	0,57 (0,20–1,67)	0,32	10	0,70 (0,22–2,26)	0,60	5	0,42 (0,11–1,44)	0,24
GG	14	36	1,29 (0,51–3,29)	0,68	20	1,21 (0,43–3,46)	0,81	16	1,39 (0,45–4,28)	0,61
<i>MDR1</i> C3435T										
CT	27	41	0,21 (0,05–0,7)	0,01	23	0,20 (0,04–0,75)	0,01	18	0,22 (0,05–0,90)	0,02
TT	0	13	∞ (1,52– ∞)	0,01	8	∞ (1,94– ∞)	0,01	5	∞ (1,01– ∞)	0,02
CC	4	16	2,00 (0,56–8,97)	0,29	9	1,96 (0,47–9,63)	0,37	7	2,05 (0,45–10,7)	0,34
<i>MTHFR</i> C677T										
CT	10	26	0,71 (0,24–2,12)	0,62	15	0,72 (0,22–2,37)	0,59	11	0,69 (0,20–2,47)	0,58
TT	3	7	0,70 (0,14–4,64)	0,69	5	0,90 (0,16–6,47)	1,0	2	0,45 (0,04–4,41)	0,64
CC	9	37	1,62 (0,55–4,88)	0,46	20	1,44 (0,45–4,76)	0,59	17	1,89 (0,54–6,69)	0,40
<i>GSTM1</i>										
«не 0»	19	46	1,34 (0,48–4,05)	0,64	26	1,28 (0,04–4,27)	0,79	20	1,43 (0,42–4,97)	0,59
«0»	8	26	0,74 (0,25–2,10)	0,64	14	0,78 (0,23–2,50)	0,79	12	0,70 (0,20–2,38)	0,59
<i>GSTT1</i>										
«не 0»	0	68	5,95 (1,32–9,97)	0,01	36	3,15 (0,69–16,25)	0,10	32	∞ (2,00– ∞)	0,003
«0»	7	4	0,17 (0,03–0,76)	0,01	4	0,32 (0,61–1,03)	0,10	0	0 (0,0–0,49)	0,003

При анализе генотипов *MDR1* G2677T, *MTHFR* и *GSTM1* не выявлено статистически значимых ассоциаций их аллельных вариантов с риском развития острого лейкоза. Это свидетельствует о том, что ни один из этих генетических вариантов не является фактором предрасположенности к этому заболеванию. Наши данные согласуются с рядом опубликованных ранее исследований у детей с острыми лейкозами, где не было выявлено ассоциаций данных полиморфизмов с риском развития ОЛ [17; 21; 24], хотя существуют не менее убедительные публикации в которых показана связь изучаемых полиморфизмов (например, *GSTM1* и *MTHFR* C677T) с развитием лейкозов [8; 25].

Анализируя ассоциации полиморфных вариантов гена *MDR1* C3435T с риском развития ОЛ, установлено, что гетерозиготные индивидуумы с одним аллелем «дикого» типа характеризуются сниженным риском развития ОЛ (ОШ, 0,21; 95 % ДИ, 0,05–0,70), а гомозиготные носители 2 «мутантных» аллелей ТТ имеют значительный риск развития лейкоза как ОЛЛ, так и ОМЛ ($p = 0,01$ и $p = 0,02$ соответственно). Наши результаты подтверждают данные, опубликованные польскими учеными в 2004 г., о достоверной ассоциации генотипа Т3435Т с риском возникновения ОЛЛ у детей, по сравнению с «диким» и гетерозиготным носительством [11]. Исследования последних десятилетий приводят к пониманию фундаментальной роли гена *MDR1* в регулировании апоптоза и иммунных реакций: белок *MDR1* защищает клетки от апоптоза индуцированного цитотоксическими препаратами, ксенобиотиками и клеточными метаболитами [17; 23; 26].

При анализе ассоциаций полиморфных вариантов гена *GSTT1* выявлено, что у детей с «не нулевым» генотипом почти в 6 раз повышен риск развития ОЛ по сравнению с пациентами с «0» генотипом ($p = 0,01$). Однако, если для детей с ОЛЛ этот риск не является статистически значимым ($p = 0,10$), то для группы с ОМЛ он является достоверным ($p = 0,003$).

Гены *GST* вовлечены в детоксификацию значимых канцерогенов, находящихся в окружающей среде. При этом полиморфизмы этих генов, и в частности делеции *GSTT1* и *GSTM1*, с высокой частотой находят среди пациентов с различными видами рака [11]. Поэтому собственные результаты кажутся несколько противоречивыми, но они согласуются с рядом подобных работ, в частности американских и португальских ученых [22; 23]. Известно, что белки генов *GSTM1* and *GSTT1* участвуют во II фазе детоксификации, во время которой происходит инактивация канцерогенов, поэтому, по литературным данным, частота «ноль» генотипов увеличена среди пациентов с лейкозами [11; 21]. Тем не менее, Barnette, et al. [22] утверждает, что фермент *GSTT1* также участвует в I фазе детоксификации, где происходит именно активация канцерогенов. К тому же значение полиморфизмов *GSTT1* может зависеть от комплекса факторов, влияющих на генотип, в частности от генетического профиля других генов, участвующих в детоксификации ксенобиотиков, а также от местных факторов окружающей среды. В связи с этим, по мнению Barnette, et al., оценка рисков, связанных с тем или иным генотипом, имеет смысл применительно к локальному географическому региону, каким и является территория нашей республики.

Таким образом, для правильной интерпретации полученных результатов, необходимо учитывать не только этнические особенности групп, но и факторы среды, а также степень риска, связанного с тем или иным индивидуальным ферментом биотрансформации, так как метаболизм с участием этих энзимов снижает токсичность одних и увеличивает токсичность других ксенобиотиков. Поэтому генотип, который можно считать фактором риска в одних условиях, может быть фактором устойчивости в других. При этом не обязательно мутантный признак становится фактором риска: таковым может являться и нормальный генотип.

Надо отметить, что несмотря на малые группы, подобные исследования представляют большой практический интерес и нуждаются в дальнейшем продолжении исследований.

Заключение

При изучении распределения полиморфных вариантов генов *MDR1* G2677T, *MTHFR* C677T среди детей с острыми лейкозами и группе сравнения не выявлено статистически значимых различий в распространенности аллелей генов и соответствующих генотипов среди анализируемых групп.

Однако обнаружены достоверные различия в распределении генотипов *MDR1* C3435T между пациентами с ОЛЛ, ОМЛ и группой сравнения. Мутантный генотип *MDR1* T3435T выявлен исключительно среди детей с лейкозами, а гетерозиготное носительство было характерно для детей группы сравнения.

При оценке распространенности генотипов *GSTM1* и *GSTT1* среди исследуемых групп выявлено, что частоты генотипов *GSTM1* между группами были близки и статистически значимо не различались. При анализе частот генотипов *GSTT1* выявлено достоверное различие между пациентами с ОМЛ и группой сравнения. «Ноль» генотип *GSTT1* чаще встречался в группе сравнения, чем в группе с ОМЛ ($p = 0,003$) и чаще, чем в группе с ОЛЛ ($p > 0,05$).

При анализе ассоциаций полиморфных вариантов гена *MDR1* C3435T с риском развития ОЛ установлено, что гетерозиготные индивидуумы с аллелем «дикого» типа *MDR1* C3435T характеризуются сниженным риском развития ОЛ, а гомозиготные носители 2 мутантных аллелей *MDR1* T3435T имеют значительный риск развития лейкоза как ОЛЛ, так и ОМЛ ($p = 0,01$ и $p = 0,02$ соответственно).

При анализе ассоциаций полиморфных вариантов гена *GSTT1* обнаружено, что у детей с «не 0» генотипом почти в 6 раз повышен риск развития ОЛ по сравнению с пациентами с «0» генотипом. Он значительно выше именно в отношении риска развития ОМЛ ($p = 0,003$).

Не выявлено статистически значимых ассоциаций полиморфизмов *MDR1* G2677T, *MTHFR* C677T и *GSTM1* с риском развития острого лейкоза, свидетельствующих о том, что ни один из этих изученных генотипов не является фактором предрасположенности к этому заболеванию.

Библиографические ссылки

1. Reizine NM, O'Donnell PH. Modern developments in germline pharmacogenomics for oncology prescribing. *CA Cancer Journal for Clinicians*. 2022;72(4):315–332. DOI: 10.3322/caac.21722.
2. Weiss J, Kopecky K, Godwin J, Anderson J, Willman C, Moysich K, Slovak M, Hoque A, Ambrosone C. Glutathione S-transferase (*GSTM1*, *GSTT1* and *GSTA1*) polymorphisms and outcomes after treatment for acute myeloid leukemia: pharmacogenetics in Southwest Oncology Group (SWOG) clinical trials. *Leukemia*. 2007;20(12):2169–2171. DOI: 10.1038/sj.leu.2404421.
3. Cameron K. Etiology of acute leukemia: a review. *Cancers (Basel)*. 2021;13(9):2256. DOI: 10.3390/cancers13092256.
4. Illmer T, Schuler U, Thiede C, Schwarz U, Kim R, Gotthard S, Freund D, Schakel U, Ehninger G, Schaich M. *MDR1* Gene Polymorphisms Affect Therapy Outcome in Acute Myeloid Leukemia Patients. *Cancer Research*. 2002;62:4955–4962.
5. Bagdasaryan AA, Chubarev BB, Smolyarchuk EA, Drozdov VN, Krasnyuk II, Liu J, Ruitai F, Tse E, Shikh EV, Sukocheva OA. Pharmacogenetics of Drug Metabolism: The Role of Gene Polymorphism in the Regulation of Doxorubicin Safety. *Cancers*. 2022;14:5436–5441. DOI: 10.3390/cancers14215436.
6. Tsang BL, Devine OJ, Cordero AM, et al. Assessing the association between the methylenetetrahydrofolate reductase (*MTHFR*) 677C>T polymorphism and blood folate concentrations: a systematic review and meta-analysis of trials and observational studies. *American Journal of Clinical Nutrition*. 2015;101(6):1286–1294. DOI: 10.3945/ajcn.114.099994.
7. Robien K, Ulrich C. 2, 3 5, 10-Methylenetetrahydrofolate Reductase Polymorphisms and Leukemia Risk: A HuGE Minireview. *American Journal of Epidemiology*. 2003;157:571–582. DOI: 10.1093/aje/kwg024.
8. Krajcinovic M, Lamothe S, Labuda D, Lemieux-Blanchard E, Theoret T, Moghrabi A, Sinnett D. Role of *MTHFR* genetic polymorphisms in the susceptibility to childhood acute lymphoblastic leukemia. *Blood*. 2004;103(1):252–257. DOI: 10.1182/blood-2003-06-1794.
9. Амромина АМ, Ситников ИА, Шаихова ДР. Взаимосвязь полиморфных вариантов генов *GSTM1*, *GSTT1*, *GSTP1* с риском развития заболеваний (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2021;100(12):1385–1390. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-12-1385-1390.
10. Moulik NR, Parveen F, Kumar A, Agrawal S. Glutathione-S-transferase polymorphism and acute lymphoblastic leukemia (ALL) in north Indian children: a case–control study and meta-analysis. *Journal Human Genetics*. 2014;59:529–535. DOI: 10.1038/jhg.2014.66.
11. Takanashi M, Mjrimoto A, Yagi A, Kuriyama K, Kano G, Imamura T, Hibi S, Todo S, Imashuku S. Impact of glutathione S-transferase gene deletion on early relapse in childhood B-precursor acute lymphoblastic leukemia. *Haematologica*. 2003;88:1238–1244.
12. Rocha J, Cheng C, Liu W, Kishi S, Das S, Cook E, Sandlund J, Rubnitz J, Ribeiro R, Campana D, Pui C, Evans W, Relling M. Pharmacogenetics of outcome in children with acute lymphoblastic leukemia *Blood*. 2005;105(12):4752–4758. DOI: 10.1182/blood-2004-11-4544.
13. Ling M R. Isolation of Total Cellular DNA from Tissues and Cultured Cells. *Molecular Biomethods Handbook*. Totowa: Humana Press; 1996. p. 9–16.
14. Song P, Li S, Meibohm B, Gaber A, Honaker M, Kotb M, Yates C. Detection of *MDR1* single Nucleotide polymorphisms C3435T and G2677T using real-time polymerase chain reaction: *MDR1* single nucleotide polymorphism genotyping assay. *AAPS PharmSciTech*. 2002;4(4):89–94. DOI: 10.1208/ps040429.
15. Schmitz C, Lindpaintner K, Verhoef P, Gaziano JM, Buring J. Genetic polymorphism of methylenetetrahydrofolate reductase and myocardial infarction. A case-control study. *Circulation*. 1996;94(8):1812–4. DOI: 10.1161/01.cir.94.8.1812.
16. Chang JG, Lee LS, Chen CM, Shih MC, Wu MC, Tsai FJ, Liang DC. Molecular analysis of thiopurine S-methyltransferase alleles in South-east Asian populations. *Pharmacogenetics*. 2002;12(3):191–195. DOI: 10.1097/00008571-200204000-00003.
17. Urayama K, Wiencke J, Buffler P, Chokkalingam A, Metayer C, Wiemels J. *MDR1* gene variants, indoor insecticide exposure and the risk of childhood lymphoblastic leukemia. *Cancer Epidemiology & Prevention*. 2007;16(6):1172–1177. DOI: 10.1158/1055-9965.EPI-07-0007.
18. Hattori H, Suminoe A, Wada M, Koga Y, Kohno K, Okamura J, Hara T, Matsuzaki A. Regulatory polymorphisms of multidrug resistance 1 (*MDR1*) gene are associated with the development of childhood acute lymphoblastic leukemia. *Leukemia Research*. 2007;31(12):1633–40. DOI: 10.1016/j.leukres.2007.04.009.
19. Botto L, Yang Q. 5,10-Methylenetetrahydrofolate Reductase Gene Variants and Congenital Anomalies. *American Journal of Epidemiology*. 2000;151:862–877. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aje.a010290.

20. Kargas C, Krupa R, Walter Z. Combined genotype analysis of GSTM1 and GSTT1 polymorphisms in a Polish population. *Human Biology*. 2003;75(2):301–307. DOI: 10.1353/hub.2003.0033.
21. Гра О, Глотов А, Кожекбаева Ж, Макарова О, Наседкина Т. Генетический полиморфизм GST, NAT2 и MTHFR и предрасположенность к развитию острого лейкоза детей. *Молекулярная биология*. 2008;42(2):214–225.
22. Barnette P, Scholl R, Blandford M, Ballard L, Tsodikov A, Magee J, Williams S, Robertson M, Ali-Osman F, Lemons R, Keller C. High-Throughput Detection of Glutathione S-Transferase Polymorphic Alleles in a Pediatric Cancer Population. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*. 2004;13:304–313.
23. Alves S, Amorim A, Ferreira F, Norton L., Prata M. The GSTM1 and GSTT1 genetic polymorphisms and susceptibility to acute lymphoblastic leukemia in children from north Portugal. *Leukemia*. 2002;16:1565–1567. DOI: 10.1038/sj.leu.2402543.
24. Cheok M, Evans W. Acute lymphoblastic leukaemia: a model for the pharmacogenomics of cancer therapy. *Nature Reviews Cancer*. 2006;6:117–129. DOI: 10.1038/nrc1800.
25. de Jonge R, Tissing W, Hooijberg J, Jansen G, Kaspers G, Lindemans J, Peters G, Pieters R. Polymorphism in folat-related genes and risk of pediatric acute lymphoblastic leukemia. *Blood*. 2004;113(10):2284–2289. DOI: 10.1182/blood-2008-07-165928.
26. Sakaeda T. MDR1 genotype- related pharmacokinetics: fact or fiction? *Drug Metabolism and Pharmacokinetics*. 2005;20(6):391–414. DOI: 10.2133/dmpk.20.391.

References

1. Reizine NM, O'Donnell PH. Modern developments in germline pharmacogenomics for oncology prescribing. *CA Cancer Journal for Clinicians*. 2022;72(4):315–332. DOI: 10.3322/caac.21722.
2. Weiss J, Kopecky K, Godwin J, Anderson J, Willman C, Moysich K, Slovak M, Hoque A, Ambrosone C. Glutathione S-transferase (GSTM1, GSTT1 and GSTA1) polymorphisms and outcomes after treatment for acute myeloid leukemia: pharmacogenetics in Southwest Oncology Group (SWOG) clinical trials. *Leukemia*. 2007;20(12):2169–2171. DOI: 10.1038/sj.leu.2404421.
3. Cameron K. Etiology of acute leukemia: a review. *Cancers (Basel)*. 2021;13(9):2256. DOI: 10.3390/cancers13092256.
4. Illmer T, Schuler U, Thiede C, Schwarz U, Kim R, Gotthard S, Freund D, Schakel U, Ehninger G, Schaich M. MDR1 Gene Polymorphisms Affect Therapy Outcome in Acute Myeloid Leukemia Patients. *Cancer Research*. 2002;62:4955–4962.
5. Bagdasaryan AA, Chubarev BB, Smolyarchuk EA, Drozdov VN, Krasnyuk II, Liu J, Ruitai F, Tse E, Shikh EV, Sukocheva OA. Pharmacogenetics of Drug Metabolism: The Role of Gene Polymorphism in the Regulation of Doxorubicin Safety. *Cancers*. 2022;14:5436–5441. DOI: 10.3390/cancers14215436.
6. Tsang BL, Devine OJ, Cordero AM, et al. Assessing the association between the methylenetetrahydrofolate reductase (MTHFR) 677C>T polymorphism and blood folate concentrations: a systematic review and meta-analysis of trials and observational studies. *American Journal of Clinical Nutrition*. 2015;101(6):1286–1294. DOI: 10.3945/ajcn.114.099994.
7. Robien K, Ulrich C. 2, 3 5, 10-Methylenetetrahydrofolate Reductase Polymorphisms and Leukemia Risk: A HuGE Minireview. *American Journal of Epidemiology*. 2003;157:571–582. DOI: 10.1093/aje/kwg024.
8. Krajinovic M, Lamothe S, Labuda D, Lemieux-Blanchard E, Theoret T, Moghrabi A, Sinnett D. Role of MTHFR genetic polymorphisms in the susceptibility to childhood acute lymphoblastic leukemia. *Blood*. 2004;103(1):252–257. DOI: 10.1182/blood-2003-06-1794.
9. Amromina AM, Sitnikov IA, Shaikhova DR. *Vzaimosvyaz' polimorfnykh variantov genov GSTM1, GSTT1, GSTP1 s riskom razvitiya zabolevaniy (obzor literatury)* [Relationship of polymorphic variants of GSTM1, GSTT1, GSTP1 genes with the risk of disease development]. *Hygiene and Sanitation*. 2021;100(12):1385–1390. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-12-1385-1390. Russian.
10. Moulik NR, Parveen F, Kumar A, Agrawal S. Glutathione-S-transferase polymorphism and acute lymphoblastic leukemia (ALL) in north Indian children: a case-control study and meta-analysis. *Journal Human Genetics*. 2014;59:529–535. DOI: 10.1038/jhg.2014.66.
11. Takanashi M, Mjrimoto A, Yagi A, Kuriyama K, Kano G, Imamura T, Hibi S, Todo S, Imashuku S. Impact of glutathione S-transferase gene deletion on early relapse in childhood B-precursor acute lymphoblastic leukemia. *Haematologica*. 2003;88:1238–1244.
12. Rocha J, Cheng C, Liu W, Kishi S, Das S, Cook E, Sandlund J, Rubnitz J, Ribeiro R, Campana D, Pui C, Evans W, Relling M. Pharmacogenetics of outcome in children with acute lymphoblastic leukemia *Blood*. 2005;105(12):4752–4758. DOI: 10.1182/blood-2004-11-4544.
13. Ling M R. Isolation of Total Cellular DNA from Tissues and Cultured Cells. *Molecular Biotechnology Handbook*. Totowa: Humana Press; 1996. p. 9–16.
14. Song P, Li S, Meibohm B, Gaber A, Honaker M, Kotb M, Yates C. Detection of MDR1 single Nucleotide polymorphisms C3435T and G2677T using real-time polymerase chain reaction: MDR1 single nucleotide polymorphism genotyping assay. *AAPS PharmSciTech*. 2002;4(4):89–94. DOI: 10.1208/ps040429.
15. Schmitz C, Lindpaintner K, Verhoef P, Gaziano JM, Buring J. Genetic polymorphism of methylenetetrahydrofolate reductase and myocardial infarction. A case-control study. *Circulation*. 1996;94(8):1812–4. DOI: 10.1161/01.cir.94.8.1812.
16. Chang JG, Lee LS, Chen CM, Shih MC, Wu MC, Tsai FJ, Liang DC. Molecular analysis of thiopurine S-methyltransferase alleles in South-east Asian populations. *Pharmacogenetics*. 2002;12(3):191–195. DOI: 10.1097/00008571-200204000-00003.
17. Urayama K, Wiencke J, Buffler P, Chokkalingam A, Metayer C, Wiemels J. MDR1 gene variants, indoor insecticide exposure and the risk of childhood lymphoblastic leukemia. *Cancer Epidemiology & Prevention*. 2007;16(6):1172–1177. DOI: 10.1158/1055-9965.EPI-07-0007.

18. Hattori H, Suminoe A, Wada M, Koga Y, Kohno K, Okamura J, Hara T, Matsuzaki A. Regulatory polymorphisms of multidrug resistance 1 (MDR1) gene are associated with the development of childhood acute lymphoblastic leukemia. *Leukemia Research*. 2007;31(12):1633–40. DOI: 10.1016/j.leukres.2007.04.009.
19. Botto L, Yang Q. 5,10-Methylenetetrahydrofolate Reductase Gene Variants and Congenital Anomalies. *American Journal of Epidemiology*. 2000;151:862–877. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aje.a010290.
20. Kargas C, Krupa R, Walter Z. Combined genotype analysis of GSTM1 and GSTT1 polymorphisms in a Polish population. *Human Biology*. 2003;75(2):301–307. DOI: 10.1353/hub.2003.0033.
21. Gra O, Glotov A, Kozhebaeva J, Makarova O, Nasedkina T. *Geneticheskiy polimorfizm GST, NAT2 i MTNFR i predispozitsionnost' k razvitiyu ostrogo leykoza detey* [Genetic polymorphism of GST, NAT2 and MTHFR and predisposition to development of childhood acute leukemia]. *Molecular Biology*. 2008;42(2):214–225. Russian.
22. Barnette P, Scholl R, Blandford M, Ballard L, Tsodikov A, Magee J, Williams S, Robertson M, Ali-Osman F, Lemons R, Keller C. High-Throughput Detection of Glutathione S-Transferase Polymorphic Alleles in a Pediatric Cancer Population. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*. 2004;13:304–313.
23. Alves S, Amorim A, Ferreira F, Norton L., Prata M. The GSTM1 and GSTT1 genetic polymorphisms and susceptibility to acute lymphoblastic leukemia in children from north Portugal. *Leukemia*. 2002;16:1565–1567. DOI: 10.1038/sj.leu.2402543.
24. Cheok M, Evans W. Acute lymphoblastic leukaemia: a model for the pharmacogenomics of cancer therapy. *Nature Reviews Cancer*. 2006;6:117–129. DOI: 10.1038/nrc1800.
25. de Jonge R, Tissing W, Hooijberg J, Jansen G, Kaspers G, Lindemans J, Peters G, Pieters R. Polymorphism in folat-related genes and risk of pediatric acute lymphoblastic leukemia. *Blood*. 2004;113(10):2284–2289. DOI: 10.1182/blood-2008-07-165928.
26. Sakaeda T. MDR1 genotype- related pharmacokinetics: fact or fiction? *Drug Metabolism and Pharmacokinetics*. 2005;20(6):391–414. DOI: 10.2133/dmpk.20.391.

Статья поступила в редколлегию 09.03.2023.
Received by editorial board 09.03.2023.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 630.18:630.425:582

РЕАКЦИЯ ПИГМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ НА ГАЗОПЫЛЕВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

Е. А. САМУСИК¹⁾, С. Е. ГОЛОВАТЫЙ²⁾

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

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

В исследовании приведены результаты оценки функционального состояния древесных растений, произрастающих в зоне влияния предприятия по производству строительных материалов. Показано, что газопылевые выбросы предприятия по производству строительных материалов (ОАО «Красносельскстройматериалы») вызывают перестройку функционирования фотосинтетического аппарата древесных растений.

Установлено, что осаждение газопылевых веществ на поверхности листового аппарата древесных растений приводит к разнонаправленному изменению функционирования пигментной системы (хлорофилла *a* и *b*, каротиноидов) растений. В исследованиях установлено значительное снижение соотношения хлорофиллов *a* + *b* / каротиноиды в радиусе 1 км от источника загрязнения в листьях березы повислой на 51–68,6 % и на расстоянии 6,5 км в северо-восточном направлении – на 48,2 %.

Образец цитирования:

Самусик ЕА, Головатый СЕ. Реакция пигментной системы древесных растений на газопылевое загрязнение. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;2:78–86.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-78-86>

For citation:

Samusik EA, Golovaty SE. Reaction of the pigment system woody plants for gas and dust pollution. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;2:78–86. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-78-86>

Авторы:

Елена Андреевна Самусик – старший преподаватель кафедры экологии.
Сергей Ефимович Головатый – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; заведующий кафедрой экологического мониторинга и менеджмента.

Authors:

Elena A. Samusik, senior lecturer at the department of ecology.
e.samusik@mail.ru
Sergei E. Golovaty, doctor of science (agriculture), full professor; head of the department of environmental monitoring and management.
ssience@yandex.ru

Для сосны обыкновенной отмечена противоположная направленность: увеличение соотношения хлорофиллов $a+b$ / каротиноиды в радиусе 1 км от источника загрязнения в юго-восточном направлении на 21,1 %, а также на расстоянии 1 и 6,5 км в северо-восточном направлении на 28,5–29,5 %.

Выявлено, что преобладающее направление ветра оказывает значительное влияние лишь на активность фотосинтетической системы сосны обыкновенной. При этом степень влияния на содержание хлорофилла a составила 28,9 %, на содержание хлорофилла b – 26,8 %; каротиноидов – 29,4 %.

Высокая степень изменения соотношения хлорофиллов $a + b$ / каротиноиды может являться диагностическим признаком устойчивости древесных растений к техногенным воздействиям.

Ключевые слова: техногенное загрязнение; газопылевые выбросы; предприятие по производству строительных материалов; древесные растения; хлорофилл a ; хлорофилл b ; каротиноиды.

REACTION OF THE PIGMENT SYSTEM WOODY PLANTS FOR GAS AND DUST POLLUTION

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

^a*Yanka Kupala State University of Grodno,
22 Azheshka Street, Grodno 230023, Belarus*

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

The article presents the results of assessing the functional state of woody plants growing in the zone of influence of an enterprise for the production of building materials. It has been shown that gas and dust emissions from the enterprise for the production of building materials (JSC Krasnoselskstroyaterialy) cause a restructuring of the functioning of the photosynthetic apparatus of woody plants.

It has been established that the deposition of gas and dust substances on the surface of the leaf apparatus of woody plants leads to multidirectional changes in the functioning of the pigment system (chlorophyll a and b , carotenoids) of plants. The studies found a significant decrease in the ratio of chlorophylls $a + b$ / carotenoids within a radius of 1 km from the source of pollution in the leaves of silver birch by 51–68,6 % and at a distance of 6.5 km in the northeast direction – by 48.2 %.

For Scots pine, the opposite direction was noted: an increase in the ratio of chlorophylls $a + b$ / carotenoids within a radius of 1 km from the source of pollution in a southeast direction by 21.1 %, and also at a distance of 1 and 6.5 km in a northeast direction by 28.5–29.5 %.

It was revealed that the prevailing wind direction has a significant impact only on the activity of the photosynthetic system of Scots pine. At the same time, the degree of influence on the content of chlorophyll a was 28.9 %, on the content of chlorophyll b – 26.8 %; for the content of carotenoids – 29.4 %.

A high degree of change in the ratio of chlorophylls $a + b$ / carotenoids can be a diagnostic sign of the resistance of woody plants to technogenic impacts.

Keywords: technogenic pollution; gas and dust emissions; enterprise for the production of building materials; woody plants; chlorophyll a ; chlorophyll b ; carotenoids.

Введение

Для экологической оценки качества окружающей среды используются различные биоиндикационные методы исследования, позволяющие охарактеризовать стабильность развития растений при разных условиях техногенного загрязнения.

Древесная растительность является диагностическим индикатором загрязнения промышленными выбросами окружающей среды, так как именно она благодаря высокой чувствительности первой принимает на себя техногенное воздействие.

Исследования, проведенные авторами [1–3], показывают, что разнообразие реакций растений, произрастающих в условиях загрязнения, определяется прежде всего спецификой воздействия факторов, а также степенью устойчивости разных видов растений [4].

Фотосинтез – неотъемлемый процесс жизнедеятельности растений. Основными фотосинтетическими пигментами растений являются хлорофилл a , хлорофилл b и каротиноиды. Преобладающий пигмент – хлорофилл a , выполняющий следующие важные функции: избирательное поглощение энергии света, запасание полученной энергии и преобразование ее фотохимическим путем в химическую энергию пер-

вичных фотовосстановленных и фотоокисленных соединений. Хлорофилл *b* и каротиноиды являются вспомогательными фотосинтетическими пигментами, поскольку выполняют защитную функцию [5].

Установлено, что пигментный аппарат растений довольно активно реагирует на различные изменения, происходящие в окружающей среде, в частности на техногенное загрязнение [6].

В связи с этим актуальным является оценка изменений содержания пластидных пигментов в листьях древесных растений, произрастающих в условиях длительного воздействия предприятия по производству строительных материалов, в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили в зоне влияния ОАО «Красносельскстройматериалы» (г. п. Красносельский, Волковысский р-н, Гродненская обл., Беларусь). Данное предприятие является одним из крупнейших в Беларуси предприятий, специализирующихся на производстве строительных материалов – цемента, асбестоцементных изделий и известковых материалов. В настоящее время в состав ОАО «Красносельскстройматериалы» входят четыре производственные площадки: филиал 1 «Цементный завод»; филиал 2 «Завод асбестоцементных изделий»; филиал 3 «Известковый завод»; филиал 4 «Карьероуправление» (рис. 1).

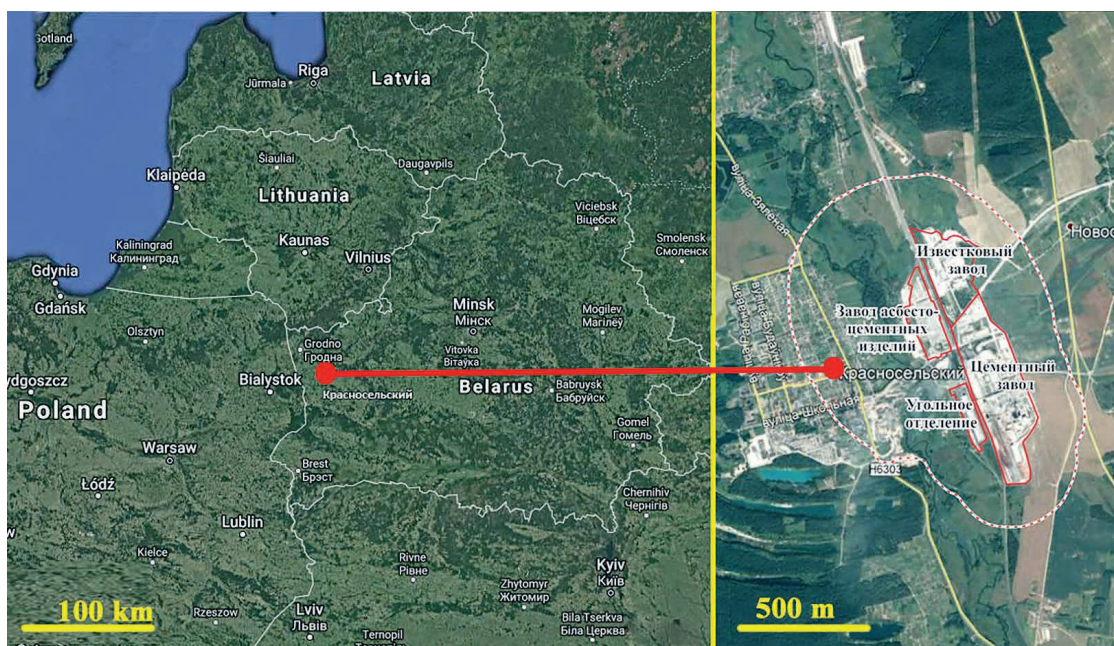


Рис. 1. Карта-схема размещения производственных площадок филиалов

Fig. 1. Map of the production sites of branches

Объектом исследования являлись доминирующие породы древесных растений на данной территории – *Betula pendula* Roth. (береза повислая) и *Pinus sylvestris* L. (сосна обыкновенная).

Предприятие по производству строительных материалов является источником не только твердых, но и газообразных загрязняющих веществ (NO_x , CO , SO_2), оказывая влияние на состояние окружающей среды.

Климатические условия территории, прилегающей к предприятию по производству строительных материалов, оценивали по метеорологическим показателям Волковысской метеорологической станции. Преобладающими потоками воздушных масс для летнего периода являются ветры с западной составляющей (СЗ, З, ЮЗ), представленные на розе-ветров (рис. 2).

В качестве диагностического органа выбрана хвоя сосны второго года жизни [7] и листья березы, так как загрязняющие вещества в первую очередь воздействуют на листовой аппарат.

Отбор растительных образцов (листьев, хвои) проводили в период с мая по июль 2020 года в соответствии с методикой¹ в градиенте расстояния от источника загрязнения (1 км, 1,5; 2,0; 3,5; 6,5; 8,0; 15,0 км) и с учетом направления (СЗ, ЮЗ, СВ, ЮВ). Использовали средневозрастные генеративные древесные растения [7]. Отбор контрольных (фоновых) растительных образцов был осуществлен на расстоянии 15 км от источника загрязнения.

¹Руководство по методам и критериям согласованного отбора проб, оценки, мониторинга и анализа влияния загрязнения воздуха на леса. Экономическая Комиссия Объединенных Наций для Европы. URL: <http://www.icp-forests.org/pdf/Rmanual1.pdf>. (дата обращения: 11.10.2022 г.).

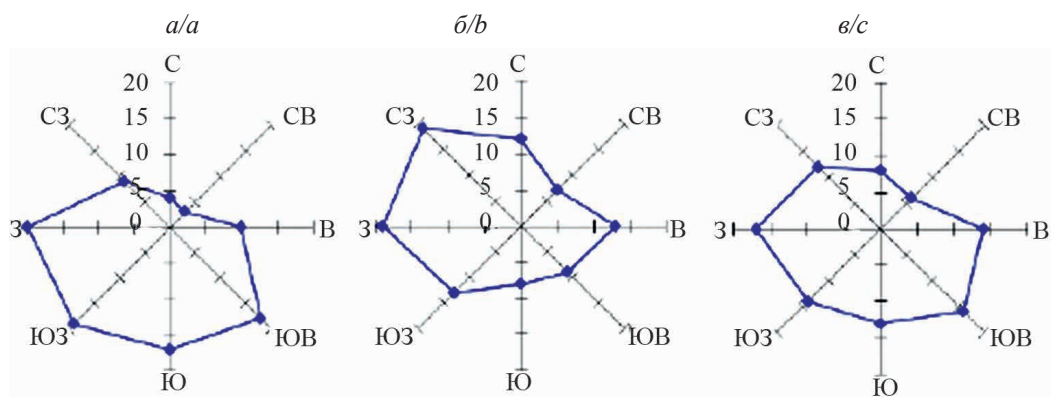


Рис. 2. Роза ветров в отдельные периоды наблюдений (а – январь, б – июль, в – год)

Fig. 2. The wind rose in certain observation periods (a – January, b – July, c – year)

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b*) определяли спектрофотометрическим методом в листьях древесных растений (в 80%-м этаноле) и рассчитывали мг/100 г сырого образца [8].

Содержание каротиноидов оценивали спектрофотометрическим методом при длине волны 440,5 нм в трехкратной повторности и рассчитывали в мг/100 г образца [9].

Полученные данные подвергались статистическому анализу с использованием программы STATISTICA 10.0.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследования свидетельствуют о наличии ответной реакции пигментной системы ассимиляционного аппарата древесных растений на газопылевое загрязнение. При этом отмечено, что максимальное содержание пигментов приходится на конец июля.

В связи с ежегодным обновлением листьев березы, данный орган реагирует на различные неблагоприятные факторы окружающей среды только в течение вегетационного периода. Поэтому наиболее высокая степень изменения (снижение на 40 % и более) количественного содержания фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b*) в сравнении с контрольными насаждениями отмечается в радиусе 1 км от источника загрязнения в юго-западном и юго-восточном направлениях, а также в радиусе 1 км и 6,5 км – в северо-восточном направлении (табл. 1).

Таблица 1

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях *B. pendula* Roth, произрастающей в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям (мг/100 г)

Table 1

The content of photosynthetic pigments in the needles of *B. pendula* Roth growing in a distance gradient from the pollution source and in directions (mg/100 g)

Пигменты	Направление	Расстояние от источника загрязнения, км						Контроль
		1	1,5	2	3,5	6,5	8	
Хлорофилл <i>a</i>	ЮЗ	2,24 ± 0,007	—*	3,47 ± 0,09	—	3,46 ± 0,03	—	3,48 ± 0,04
	ЮВ	2,76 ± 0,04	—	3,52 ± 0,007	3,49 ± 0,05	—	3,46 ± 0,05	3,47 ± 0,05
	СЗ	—	3,09 ± 0,03	3,11 ± 0,005	3,46 ± 0,05	3,29 ± 0,06	3,25 ± 0,07	3,45 ± 0,02
	СВ	3,11 ± 0,12	—	3,22 ± 0,007	3,30 ± 0,23	3,11 ± 0,04	—	3,50 ± 0,03
Хлорофилл <i>b</i>	ЮЗ	0,65 ± 0,007	—*	1,44 ± 0,11	—	1,51 ± 0,007	—	1,73 ± 0,08
	ЮВ	0,79 ± 0,01	—	1,67 ± 0,01	1,63 ± 0,11	—	1,68 ± 0,10	1,67 ± 0,32
	СЗ	—	1,05 ± 0,08	1,06 ± 0,07	1,64 ± 0,09	1,45 ± 0,007	1,69 ± 0,06	1,60 ± 0,16
	СВ	1,02 ± 0,07	—	1,22 ± 0,007	1,42 ± 0,54	1,04 ± 0,05	—	1,75 ± 0,25
Каротиноиды	ЮЗ	0,60 ± 0,01	—*	0,41 ± 0,04	—	0,43 ± 0,01	—	0,34 ± 0,03
	ЮВ	0,63 ± 0,11	—	0,44 ± 0,01	0,40 ± 0,007	—	0,43 ± 0,13	0,41 ± 0,01
	СЗ	—	0,56 ± 0,06	0,40 ± 0,04	0,39 ± 0,007	0,38 ± 0,01	0,40 ± 0,01	0,43 ± 0,04
	СВ	0,61 ± 0,01	—	0,47 ± 0,03	0,45 ± 0,16	0,58 ± 0,02	—	0,38 ± 0,01

Примечание. * – отсутствие возможности отбора растительных образцов.

Полученные данные согласуются с результатами ранее проведенных исследований по выявлению зоны максимального влияния газопылевых выбросов предприятия на реакцию почвенной среды [10; 11]. Нами также установлено, что на этот процесс влияет перенос пылевидных частиц в результате добычи и транспортировки (особенно) природного сырья из мелового карьера (находится на расстоянии 6,5 км в северо-восточном направлении от производственной площадки предприятия). В этом случае, процесс транспортировки меловых отложений в определенной степени служит дополнительным источником загрязнения окружающей среды.

Отметим, что загрязняющие вещества, особенно в виде пылевидных частиц, которые оседают на листовую пластинку березы повислой, способствуют уменьшению содержания фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b*) в сравнении с фоновыми условиями. При этом содержание хлорофилла *b* уменьшается в большей степени, чем хлорофилла *a*. Так, содержание этого пигмента в растениях, произрастающих в северо-восточном направлении, было ниже на 40,5 %, в юго-восточном и юго-западном направлениях – на 52,8–62,7 % по сравнению с контролем (табл. 1).

Ряд авторов [5; 12; 13], утверждают, что уменьшение содержания фотосинтетических пигментов в листьях растений свидетельствует об их разрушении под воздействием поллютантов.

В отличие от зеленых пигментов, количество каротиноидов по мере приближения к источнику загрязнения имеет тенденцию к увеличению. Содержание желтых пигментов в листьях березы повислой в радиусе 1 км от источника загрязнения соответствовало 0,60–0,63 мг/100 г, что в 1,4–1,8 раз больше, чем в листьях контрольного варианта (табл. 1).

Можно предположить, что в данном случае каротиноиды выполняют функцию дополнительных светопоглотителей и участвуют в качестве окислителей токсических веществ, поступающих в листовую аппарат растения. Тем самым они выполняют важную роль в защитно-приспособительных реакциях.

Следует отметить, что не выявлено статистически достоверных различий в содержании фотосинтетических пигментов в листьях березы повислой, произрастающей в разных направлениях от источника загрязнения. Таким образом, данный результат обусловлен коротким вегетационным периодом растения, а также постоянной сменой направления ветра в летний период.

В табл. 2 представлены данные по содержанию хлорофиллов и каротиноидов в хвое сосны обыкновенной, произрастающей в градиенте расстояния и по различным направлениям от источника загрязнения. Из полученных данных следует, что в условиях газопылевого загрязнения происходят значительные изменения в количестве пластидных пигментов в хвое. Наблюдается увеличение хлорофиллов *a* и *b*, а также каротиноидов (в 1,4–3,3 раза) в хвое растений, произрастающих в северо-западном направлении – в радиусе 2 км от источника загрязнения, северо-восточном – в радиусе 1 км и на расстоянии 6,5 км; юго-восточном направлении – в радиусе 3,5 км от источника загрязнения.

Таблица 2

Содержание фотосинтетических пигментов в хвое *P. sylvestris* L., произрастающей в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям (мг/100 г)

Table 2

The content of photosynthetic pigments in the needles of *P. sylvestris* L. growing in a distance gradient from the pollution source and in directions (mg/100 g)

Пигменты	Направление	Расстояние от источника загрязнения, км						Контроль
		1	1,5	2	3,5	6,5	8	
Хлорофилл <i>a</i>	ЮЗ	1,00 ± 0,002	–	1,00 ± 0,10	–	1,00 ± 0,05	–	1,06 ± 0,24
	ЮВ	2,10 ± 0,13	–	1,75 ± 0,20	1,77 ± 0,32	–	1,17 ± 0,14	1,07 ± 0,05
	СЗ	–	2,02 ± 0,09	1,95 ± 0,04	1,17 ± 0,01	1,06 ± 0,14	1,04 ± 0,14	1,09 ± 0,08
	СВ	1,74 ± 0,11	–	0,90 ± 0,05	0,97 ± 0,10	1,51 ± 0,24	–	0,99 ± 0,11
Хлорофилл <i>b</i>	ЮЗ	0,25 ± 0,02	–	0,25 ± 0,001	–	0,25 ± 0,04	–	0,20 ± 0,01
	ЮВ	0,65 ± 0,02	–	0,41 ± 0,02	0,51 ± 0,11	–	0,24 ± 0,02	0,20 ± 0,03
	СЗ	–	0,33 ± 0,02	0,32 ± 0,02	0,24 ± 0,02	0,20 ± 0,002	0,28 ± 0,05	0,16 ± 0,03
	СВ	0,41 ± 0,06	–	0,30 ± 0,04	0,18 ± 0,03	0,38 ± 0,08	–	0,22 ± 0,07
Каротиноиды	ЮЗ	0,32 ± 0,03	–	0,33 ± 0,02	–	0,33 ± 0,01	–	0,35 ± 0,08
	ЮВ	0,59 ± 0,05	–	0,57 ± 0,05	0,53 ± 0,12	–	0,38 ± 0,06	0,33 ± 0,07
	СЗ	–	0,62 ± 0,04	0,61 ± 0,01	0,35 ± 0,004	0,35 ± 0,001	0,38 ± 0,05	0,32 ± 0,007
	СВ	0,47 ± 0,03	–	0,32 ± 0,003	0,31 ± 0,002	0,41 ± 0,06	–	0,34 ± 0,01

Следует отметить, что загрязняющие вещества в газопылевом виде способствуют ускорению процессов накопления хлорофилла *b* в хвое в большей степени, чем хлорофилла *a* и каротиноидов. Так, в юго-восточном направлении от источника загрязнения содержание хлорофилла *b* в хвое сосны возрастает в 2,0–3,3 раза в сравнении с контролем.

Высокое содержание хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов свидетельствует об активации защитных механизмов, направленные на снижение негативного воздействия загрязнения, что подтверждается в ряде других работ [5; 12; 13].

Диаграммы размаха средних значений содержания хлорофилла *a* в хвое сосны обыкновенной свидетельствуют о статистически достоверных различиях содержания этого фотосинтетического пигмента в растениях, произрастающих в юго-западным и юго-восточным направлениями ($p = 0,012$); в содержании каротиноидов – между растениями, произрастающих в юго- и северо-восточных направлениях ($p = 0,028$), юго-западном и юго-восточном направлениях ($p = 0,026$), что обусловлено преобладанием ветров западной составляющей. Таким образом, сосна обыкновенная, произрастающая в юго-восточном направлении в радиусе 3,5 км от предприятия, в наибольшей степени подвергается техногенному загрязнению в связи с достоверными изменениями в пигментном комплексе.

Известно, что стресс приводит к избыточному накоплению активных форм кислорода, которые могут инициировать деструктивные окислительные процессы. Следовательно, устойчивость к окислительному стрессу, вызываемому стрессовыми факторами среды, является одним из важных параметров, характеризующих состояние фотосинтетического аппарата. Источником активных форм кислорода являются хлоропласты. Это связано с перевозбуждением и перевосстановлением антенных комплексов в результате дисбаланса между поглощением квантов света и возможностью реализации ее в процессе фотосинтеза².

К числу основных активных форм кислорода относят пероксид водорода. В норме равновесное состояние поддерживается между генерацией АФК и их дезактивацией низкомолекулярными соединениями и антиоксидантными ферментами. АФК могут одновременно выполнять двойственную функцию: выступать в роли деструктивных агентов или сигнальных молекул. Выявлено, что в условиях газопылевого загрязнения активность ферментативной антиоксидантной системы (каталазы, пероксидазы) в листьях древесных растений снижается, что подтверждается ранее проведенными исследованиями [14]. Соответственно пигментный аппарат растения принимает активное участие в формировании приспособленности к стрессовому воздействию, изменяя тем самым содержание пластидных пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов).

Устойчивость растительных организмов к стрессовым воздействиям можно оценить по отношению содержания суммы хлорофиллов к сумме каротиноидов [12]. У высших растений данное отношение изменяется в широких пределах и свидетельствует о перестройке светособирающих комплексов фотосистем.

В табл. 3 представлены данные по соотношению количества хлорофиллов и каротиноидов в листьях древесных растений, произрастающих в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям.

Отмечено значительное снижение соотношения хлорофиллов $a + b$ / каротиноиды в радиусе 1 км от источника загрязнения в листьях березы повислой на 51–68,6 % и на расстоянии 6,5 км в северо-восточном направлении – на 48,2 %. Для сосны обыкновенной отмечена противоположная направленность: увеличение соотношения хлорофиллов $a + b$ / каротиноиды в радиусе 1 км от источника загрязнения в юго-восточном направлении на 21,1 %, а также на расстоянии 1 и 6,5 км в северо-восточном направлении на 28,5–29,5 % (табл. 3). Это свидетельствует о том, что газопылевые выбросы предприятия инициируют окислительное повреждение пигментной системы растения, вследствие чего снижается устойчивость древесных растений к стрессовым воздействиям.

Обобщение данных о фотосинтетической активности листьев березы повислой и хвои сосны позволяет констатировать, что осаждение газопылевых веществ на поверхности листового аппарата древесных растений приводит к разнонаправленному изменению функционирования пигментной системы (хлорофилла *a* и *b*, каротиноидов) растений. Это возможно объясняется тем, что листья *B. pendula* Roth ежегодно обновляются, а хвоя *P. sylvestris* L. подвержена постоянному (хроническому) газопылевому загрязнению.

В частности, результаты дисперсионного анализа показали, что преобладающее направление потока воздушных масс оказывает значительное влияние лишь только на активность фотосинтетической системы сосны обыкновенной. При этом степень влияния на содержание хлорофилла *a* составила 28,9 %, хлорофилла *b* – 26,8 %; каротиноидов – 29,4 % (табл. 4).

²Динамика содержания фотосинтетических пигментов в хвое ели обыкновенной в условиях г. Барнаула. URL: <http://elibrary.asu.ru/xmlui/bitstream/handle/asu/9354/vkr.pdf> (дата обращения: 01.03.2023 г.).

Таблица 3

Соотношение суммы хлорофиллов *a* и *b* к каротиноидам в листьях древесных растений, произрастающей в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям

Table 3

The ratio of the sum of chlorophylls *a* and *b* to carotenoids in the leaves of woody plants growing in a gradient of distance from the source of pollution and in the directions

Пигменты		Направление	Расстояние от источника загрязнения, км						Контроль
			1	1,5	2	3,5	6,5	8	
Хл. <i>a</i> + <i>b</i> / каротиноиды	береза	ЮЗ	4,82	–	11,98	–	11,56	–	15,32
		ЮВ	5,63	–	11,8	12,80	–	11,95	12,54
		СЗ	–	7,39	10,43	13,08	12,47	12,35	11,74
		СВ	6,77	–	9,45	10,49	7,16	–	13,82
	сосна	ЮЗ	3,91	–	3,79	–	3,79	–	3,60
		ЮВ	4,66	–	3,79	4,30	–	3,71	3,85
		СЗ	–	3,79	3,72	4,03	3,60	3,47	3,91
		СВ	4,57	–	3,75	3,71	4,61	–	3,56

Таблица 4

Результаты однофакторного дисперсионного анализа влияния направления ветра на содержание фотосинтетических пигментов в хвое сосны обыкновенной

Table 4

The results of one-factor analysis of variance of the influence of the direction of wind direction on the content of photosynthetic pigments in Scots pine needles

Пигменты	Статистические показатели	Доля влияния фактора, %
Хлорофилл <i>a</i>	η_2 , %	28,9
	F	4,63
	p	0,008
Хлорофилл <i>b</i>	η_2 , %	26,8
	F	4,15
	p	0,013
Каротиноиды	η_2 , %	29,4
	F	4,72
	p	0,007

Примечание. * – жирным шрифтом выделены значения при $p < 0,05$.

Ранее проведенные нами исследования [14] показали взаимосвязь между уровнями окислительного стресса и антиоксидантной ферментативной активностью в листьях древесных растений, что позволило расширить область исследований по влиянию пылевого загрязнения на фотосинтетический аппарат древесных растений.

По результатам корреляционного анализа, представленным в табл. 5, отмечается разнонаправленное изменение фотосинтетической активности в листьях древесных растений, что свидетельствует об особенностях реакции ассимиляционного аппарата растения на длительное газопылевое загрязнение.

Положительно значимые корреляции между концентрацией МДА и неферментативными антиоксидантами (каротиноиды) позволяет предположить, что эти соединения играют жизненно важную роль в детоксикации образующихся активных форм кислорода в древесных растениях, что также подтверждается многими исследованиями [15]. Следует отметить, что высокая степень взаимосвязи между анализируемыми

показателями отмечена для древесных растений, произрастающих в юго-восточном направлении, поскольку основной поток воздушных масс осуществляется с северо-западного направления.

Таблица 5

Результаты корреляционного анализа изменения концентрации МДА и фотосинтетической активности в листьях березы повислой и хвое сосны обыкновенной ($p < 0,05$)

Table 5

The results of the correlation analysis of changes in the concentration of MDA and photosynthetic activity in the leaves of the hanging birch and pine needles ($p < 0.05$)

Показатель		Направление	Хлорофилл <i>a</i>	Хлорофилл <i>b</i>	Каротиноиды
Концентрация МДА	береза	Юго-запад	-0,54	-0,32	0,21
		Юго-восток	-0,63	-0,67	0,59
		Северо-запад	-0,51	-0,73	0,41
		Северо-восток	-0,71	-0,62	0,63
	сосна	Юго-запад	–*	0,22	–*
		Юго-восток	0,64	0,59	0,57
		Северо-запад	0,41	–*	0,29
		Северо-восток	0,26	0,43	0,54

Примечание. * – не обнаружена статистически достоверная взаимосвязь

Заключение

Газопылевые выбросы предприятия по производству строительных материалов (ОАО «Красносельскстройматериалы») вызывают перестройку функционирования фотосинтетического аппарата древесных растений. Отмечается разнонаправленное изменение фотосинтетической активности в листьях древесных растений, что свидетельствует об особенностях реакции ассимиляционного аппарата растения на длительное газопылевое загрязнение. Соответственно, пигментный аппарат растения принимает одно из главных участия в формировании защитно-приспособительных механизмов к стрессовому воздействию, изменяя тем самым содержание пластидных пигментов (хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов).

Высокая степень изменения соотношения хлорофиллов *a* + *b* / каротиноиды может являться диагностическим признаком слабой степени устойчивости древесных растений к техногенным воздействиям, поскольку отмечено значительное снижение соотношения хлорофиллов *a* + *b* / каротиноиды в радиусе 1 км от источника загрязнения в листьях березы повислой на 51–68,6 % и на расстоянии 6,5 км в северо-восточном направлении – на 48,2 %. Для сосны обыкновенной отмечена противоположная направленность: увеличение соотношения хлорофиллов *a* + *b* / каротиноиды в радиусе 1 км от источника загрязнения в юго-восточном направлении на 21,1 %, а также на расстоянии 1 и 6,5 км в северо-восточном направлении на 28,5–29,5 %. Процесс транспортировки меловых отложений (на расстоянии 6,5 км в северо-восточном направлении от источника загрязнения) в определенной степени служит дополнительным источником загрязнения окружающей среды.

Выявлено, что преобладающее направление ветра оказывает значительное влияние лишь только на активность фотосинтетической системы сосны обыкновенной. При этом степень влияния на содержание хлорофилла *a* составила 28,9 %, хлорофилла *b* – 26,8 %; каротиноидов – 29,4 %. Это, возможно, объясняется тем, что листья *B. pendula* L. ежегодно обновляются, а хвоя *P. sylvestris* подвержена постоянному (хроническому) газопылевому загрязнению.

Библиографические ссылки

1. Симонова ЗА, Тихомирова ЕИ, Шайденко ИС. Роль железосодержащих оксидов в адаптации древесных растений к факторам городской среды (на примере города Саратова). *Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Общая биология*. 2016;2(3):801–805.
2. Тужилкина ВВ. Реакция пигментной системы хвойных на длительное аэротехногенное загрязнение. *Экология*. 2009;4:243–248.
3. Чупахина ГН и др. Реакция пигментной и антиоксидантной систем растений на загрязнение окружающей среды г. Калининграда выбросами автотранспорта. *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2012;2(18):171–185.

4. Самусик ЕА, Марчик ТП, Головатый СЕ. Интенсивность окислительных процессов и активность антиоксидантной системы в листьях древесных растений, произрастающих в условиях техногенного загрязнения. *Социально-экологические технологии*. 2022;12(4):418–438.
5. Соколова ГГ. Влияние техногенного загрязнения на пигментный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в условиях города Барнаула. *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*. 2020;19(1):223–228.
6. Титова МС, Розломий НГ. Реакция пигментной системы сосны обыкновенной на техногенное загрязнение на территории исторически значимых объектов г. Уссурийска. *Вестник КрасГАУ*. 2014;4:170–173.
7. Федорова АИ, Никольская АН. *Практикум по экологии и охране окружающей среды*. Москва: ВЛАДОС; 2001. 288 с.
8. Туманов ВН, Личик СЛ. *Качественные и количественные методы исследования пигментов фотосинтеза*. Гродно: ГрГУ; 2007. с. 61.
9. Гулиев РБ, Азизов БМ, Аббасзаде АА. Оценка содержания хлорофилла в растениях, подвергнутых антропогенному воздействию, спектрофотометрическим методом. *Оптика и спектроскопия*. 2009;106(3):514–520.
10. Самусик ЕА, Марчик ТП, Головатый СЕ. Полифенолоксидазная и пероксидазная активность дерново-подзолистых почв в условиях воздействия выбросов предприятия по производству строительных материалов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2019;4:65–79.
11. Самусик ЕА, Головатый СЕ. Тяжелые металлы в почвах и в пшенице в зоне воздействия предприятия по производству строительных материалов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;4:76–88.
12. Хмелевская, ИА. Эколого-физиологические исследования древесных пород в условиях в г. Пскове. *Вестник Псковского государственного педагогического университета. Серия Естественные и физико-математические науки*. 2008;6:45–55.
13. Тужилкина ВВ, Плюснина СН. Структурно-функциональные изменения хвои сосны в условиях аэротехногенного загрязнения. *Лесоведение*. 2020;6:537–547.
14. Самусик ЕА, Марчик ТП, Головатый СЕ. Интенсивность окислительных процессов и активность антиоксидантной системы в листьях древесных растений, произрастающих в условиях техногенного загрязнения. *Социально-экологические технологии*. 2022;12(4):418–438.
15. Кабашникова, ЛФ и др. Содержание фотосинтетических пигментов и параметры окислительного стресса в листьях амаранта при нарастающем водном дефиците. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук*. 2021;66(3):282–294.

References

1. Simonova ZA, Tikhomirova EI, Shaidenko IS. The role of iron-containing oxidases in the adaptation of woody plants to urban environmental factors (on the example of the city of Saratov). *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. Obshhaja biologija*. 2016;2(3):801–805. Russian.
2. Tuzhilkina VV. The reaction of the pigment system of conifers to long-term aerotechnogenic pollution. *Ekologija*. 2009;4:243–248. Russian.
3. Chupakhina GN, et al. Response of the pigment and antioxidant systems of plants to environmental pollution in Kaliningrad with vehicle emissions. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologija*. 2012;2(18):171–185. Russian.
4. Samusik EA, Marchik TP, Golovaty CE. The intensity of oxidative processes and the activity of the antioxidant system in the leaves of woody plants growing under conditions of technogenic pollution. *Socialno-ekologicheskie tehnologii*. 2022;12(4):418–438. Russian.
5. Sokolova GG. Influence of technogenic pollution on the pigment composition of silver birch leaves (*Betula pendula* Roth.) in the conditions of the city of Barnaul. *Problemy botaniki Juzhnoj Sibiri i Mongolii*. 2020;19(1):223–228. Russian.
6. Titova MS, Rozlomy NG. The reaction of the pigment system of Scots pine to technogenic pollution on the territory of historically significant objects in the city of Ussuriysk. *Vestnik KrasGAU*. 2014;4:170–173. Russian.
7. Fedorova AI, Nikolskaya AN. *Praktikum po jekologii i ohrane okruzhajushhej sredy* [Workshop on ecology and environmental protection]. Moscow: VLADOS; 2001. 288 p. Russian.
8. Tumanov VN, Lichik SL. *Kachestvennyye i kolichestvennyye metody issledovaniya pigmentov fotosinteza* [Qualitative and quantitative methods for studying photosynthesis pigments]. Grodno: GrSU; 2007. p. 61. Russian.
9. Guliyev RB, Azizov BM, Abbaszade AA. Estimation of chlorophyll content in plants subjected to anthropogenic impact by spectrophotometric method. *Optika i spektroskopija*. 2009;106(3):514–520. Russian.
10. Samusik EA, Marchik TP, Golovaty CE. Polyphenol oxidase and peroxidase activity of soddy-podzolic soils under the influence of emissions from an enterprise for the production of building materials. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologija*. 2019;4:65–79. Russian.
11. Samusik EA, Golovaty CE. Heavy metals in soils and wheat in the impact zone of a building materials production facility. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologija*. 2021;4:76–88. Russian.
12. Khmelevskaya, I.A. Ecological and physiological studies of tree species in conditions in Pskov. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Serija Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki*. 2008;6:45–55. Russian.
13. Tuzhilkina VV, Plyusnina SN. Structural and functional changes in pine needles under conditions of aerotechnogenic pollution. *Lesovedenie*. 2020;6:537–547. Russian.
14. Samusik EA, Marchik TP, Golovaty SE. The intensity of oxidative processes and the activity of the antioxidant system in the leaves of woody plants growing in conditions of man-made pollution. *Socialno-ekologicheskie tehnologii*. 2022;12(4):418–438. Russian.
15. Kabashnikova LF, et al. Content of photosynthetic pigments and parameters of oxidative stress in amaranth leaves with increasing water deficit. *Vesci Nacyjanal'naj akademii navuk Belarusi. Serija bijalagichnyh navuk*. 2021;66(3):282–294. Russian.

Статья поступила в редколлегию 17.04.2023.
Received by editorial board 17.04.2023.

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СЕКТОРА: РАЗРАБОТКА КАЛЬКУЛЯТОРА СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

О. А. ЛЮБЧИК¹⁾

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

В исследовании рассматривается влияние энергетического сектора Республики Беларусь на объем выбросов парниковых газов, а также их динамика. Определено сокращение выбросов парниковых газов энергетическим сектором за счет применения возобновляемых источников энергии и ядерного топлива в 2015–2020 гг. Отдельно рассмотрены отрасли электроэнергетики и теплоэнергетики. Определен источник энергии, обеспечивший наибольшее сокращение выбросов. Предложен программный продукт – Калькулятор сокращения выбросов парниковых газов, позволяющий определить сокращение или потенциал сокращения выбросов парниковых газов при энергоснабжении от более чистых источников энергии либо при реализации энергосберегающих мероприятий. Данный продукт не требует специальной подготовки пользователя, имеет интуитивно понятное оформление, позволяет производить расчеты для потребителей топливно-энергетических ресурсов любой категории. Описаны обе методики расчета, используемые в Калькуляторе сокращения выбросов парниковых газов. Доступен расчет по универсальной методике, где пользователь может варьировать исходные условия в широком диапазоне значений и моделировать различные ситуации, а также упрощенный расчет по национальной методике, где необходим ввод только экономии топлива. По первой методике в качестве результатов расчета выводятся значения сокращения выбросов по отдельным источникам энергии, доля возобновляемых источников энергии, а также по отдельным источникам энергии. Данные представлены, в том числе, отдельно по электроэнергетике и теплоэнергетике. Результаты доступны и в графической форме – в виде гистограмм. Возможен экспорт полученных результатов в текстовый документ. При расчете по второй методике выводится только общее значение сокращения выбросов парниковых газов. Полученные по универсальной методике расчета суммарные значения сокращения выбросов парниковых газов наносятся на графическое изображение, доступное к скачиванию. Данное изображение может применяться для отражения высокого уровня экологической ответственности производителя продукции или поставщика услуг, их заботе об окружающей среде и принимаемым мерам, препятствующим росту темпов глобального потепления. Оценен потенциальный эффект широкого доступа потребителей топливно-энергетических ресурсов к расчету сокращения выбросов парниковых газов.

Ключевые слова: выбросы парниковых газов; энергетический сектор; возобновляемые источники энергии; ядерная энергия; сокращение выбросов; калькулятор.

Благодарность: Евгении Ивановне Бертош – старшему научному сотруднику, Отдел международного научного сотрудничества и климата, РУП «БелНИЦ «Экология»; Дмитрию Владимировичу Мелеху – заместителю заведующего отделом международного научного сотрудничества и климата, РУП «БелНИЦ «Экология» за экспертную оценку и ценные советы.

Образец цитирования:

Любчик ОА. Декарбонизация энергетического сектора: разработка Калькулятора сокращения выбросов парниковых газов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;2:87–95.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-87-95>

For citation:

Liubchik VA. Energy sector decarbonization: avoided greenhouse gas emissions Calculator developing. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;2:87–95. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-87-95>

Автор:

Ольга Андреевна Любчик – старший преподаватель кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии».

Author:

Volha A. Liubchik, senior lecturer at the UNESCO department «Energy conservation and renewable energy sources».
olga.liubchik@yandex.ru

ENERGY SECTOR DECARBONIZATION: AVOIDED GREENHOUSE GAS EMISSIONS CALCULATOR DEVELOPING

V. A. LIUBCHYK^a

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

The presented materials show the impact of the energy sector of the Republic of Belarus on the volume of greenhouse gas emissions, as well as the dynamics of emissions. The reduction of greenhouse gas emissions by the energy sector through the use of renewable energy sources and nuclear energy in the 2015–2020 has been determined. The branches of electric power industry and thermal power industry are considered separately. A source of energy that has provided the greatest reduction in emissions has been identified. A software product – Avoided Greenhouse Gas Emissions Calculator – is described; it allows determining the reduction or potential for reducing greenhouse gas emissions when energy is supplied from clean energy sources or when energy-saving measures are implemented. This product does not require special user training, has an intuitive design, and allows making calculations for consumers of fuel and energy resources of any category. Calculations according to the universal method, where the user can vary the source data in a wide range of values and simulate different situations, and according to the national simplified method, where only fuel economy needs to be entered, are available. When calculating according to the first method, the values of avoided emissions by each energy source and the share of renewable energy sources, also for each energy source, are displayed as calculation results. The data are presented separately for the electric power industry and heat power industry. The results are also available in graphical form – in the form of histograms. It is possible to export obtained results to a text document. When calculating according to the second method, only the total value of avoided greenhouse gas emissions is displayed. The total values of avoided greenhouse gas emissions obtained by the universal calculation method are also applied to a graphic image available for downloading. This image can be used to reflect the high level of environmental responsibility of a product manufacturer or service provider, their concern for the environment and the measures taken to prevent increase of global warming rate. The potential effect of wide access for consumers of fuel and energy resources to Avoided Greenhouse Gas Emissions Calculator is estimated.

Keywords: greenhouse gas emissions; energy sector; renewable energy sources; nuclear energy; emissions reduction; calculator.

Acknowledgments: Evgeniya Ivanovna Bertosh, senior researcher, scientific research cooperation and climate department at the RUE «BelSRC «Ecology», Dzmitry Vladimirovich Melekh, deputy heard at the scientific research cooperation and climate department at the RUE «BelSRC «Ecology» for expert assessment and valuable advice.

Введение

Республика Беларусь, являясь стороной Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата, согласно принятым обязательствам, предпринимает действия по сокращению выбросов парниковых газов в окружающую среду. На регулярной основе публикуются кадастры антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями всех парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, в том числе выбросы по категории «Энергетика». Энергетический сектор является наиболее крупным источником выбросов парниковых газов. За последнее десятилетие выбросы энергетического сектора составляли 64–65 %, а выбросы категории 1A1 «Энергетическая промышленность», куда входят производство электрической и тепловой энергии, а также производство топлив, в том числе переработка нефти – 35–38 % от суммы совокупных выбросов парниковых газов без учета сектора «Землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство» (далее – ЗИЗЛХ)¹ [1; 2]. Следует отметить, что за 2010–2020 гг. выбросы парниковых газов в энергетическом секторе страны удалось сократить на 5,4 %, а выбросы энергетической промышленности – на 8,0 %.

Материалы и методы исследования

Согласно исследованию Международного агентства IRENA [3], наибольшее снижение выбросов парниковых газов будет происходить за счет сочетания использования возобновляемых источников энергии, электрификации секторов конечного потребления и повышения энергоэффективности. За последние 10 лет основной эффект по декарбонизации за счет смены видов топлива в мире наблюдался именно за счет развития возобновляемой энергетики [4].

¹Сводная информация о выбросах парниковых газов в Беларуси. Профили парниковых газов (Приложение I. Рамочная конвенция ООН об изменении климата).

По состоянию на 2020 г., в Республике Беларусь наибольший вклад в сокращение выбросов за счет смены источника энергоснабжения внесли возобновляемые источники энергии. Достигнутые результаты в областях электро- и теплоэнергетики представлены на рис. 1 и 2.

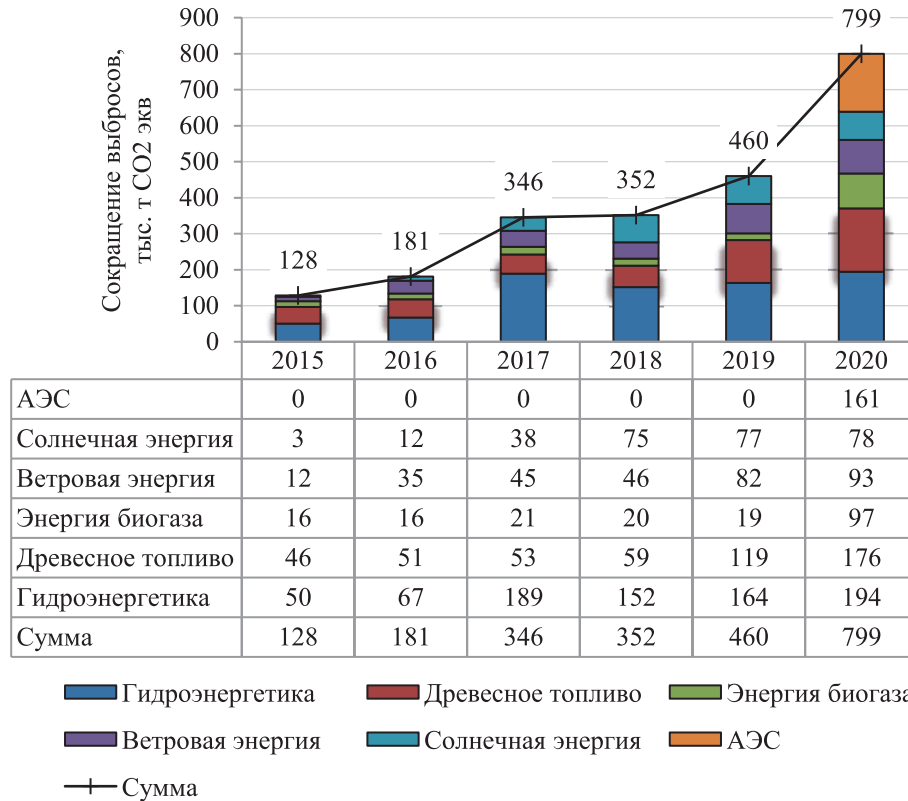


Рис. 1. Снижение выбросов парниковых газов в электроэнергетике в зависимости от источника, тыс. т CO₂ экв.

Fig. 1. Avoided greenhouse gas emissions in the power industry depending on the source, thousand tons of CO₂ eq.

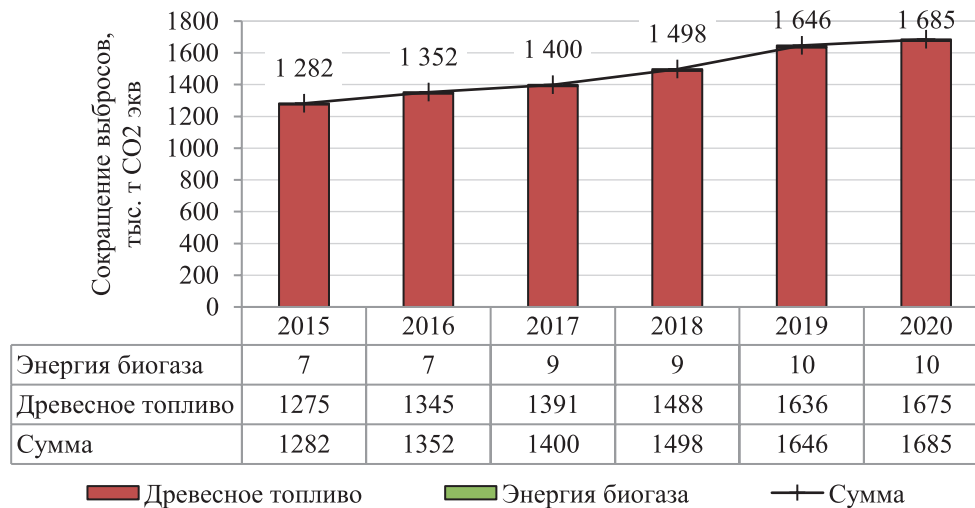


Рис. 2. Снижение выбросов парниковых газов в теплоэнергетике в зависимости от источника, тыс. т CO₂ экв.

Fig. 2. Avoided greenhouse gas emissions in thermal power industry depending on the source, thousand tons of CO₂ eq.

Общий вклад чистых источников энергии в снижение выбросов парниковых газов стационарными источниками энергии отображен на рис. 3.

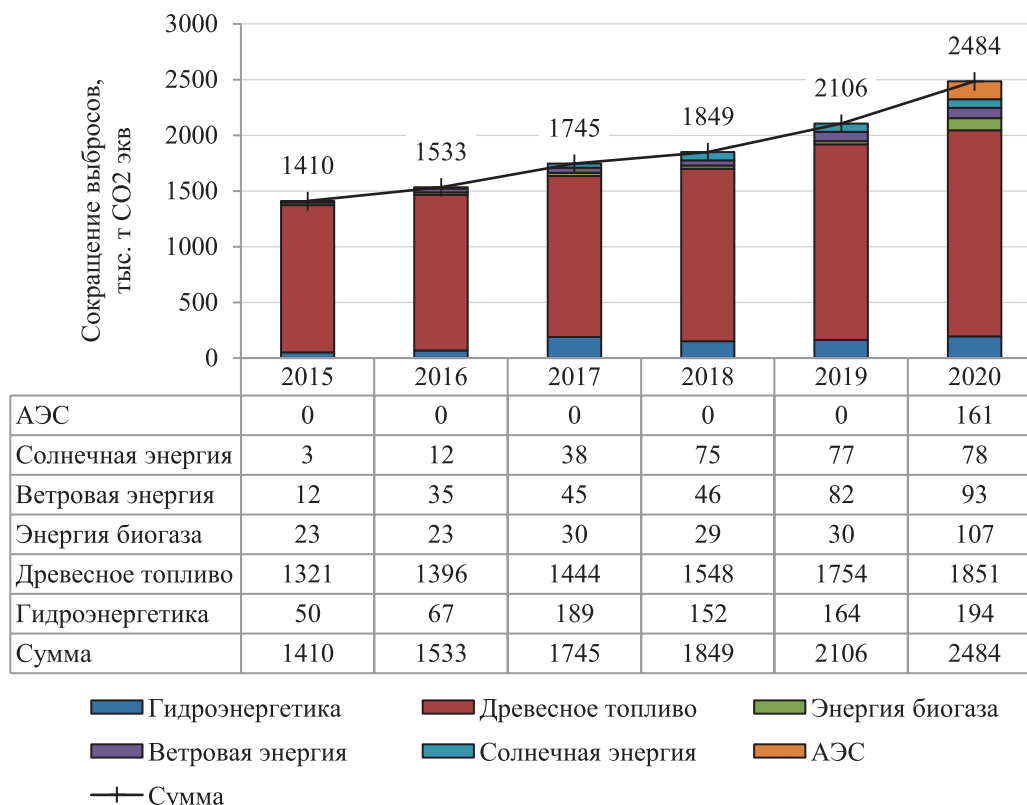


Рис. 3. Снижение выбросов парниковых газов стационарными источниками энергии в зависимости от источника, тыс. т CO₂ экв.

Fig. 3. Avoided greenhouse gas emissions from stationary energy sources, depending on the source, thousand tons of CO₂ eq.

Сокращение выбросов, проиллюстрированное на рис. 1–3, определено с учетом замещения аналогичного количества энергии, выработанного при сжигании ископаемых топлив. В расчетах учтены выбросы на протяжении всего жизненного цикла как для замещаемых, так и для замещающих источников энергии.

Как следует из рис. 1–3, наибольший вклад из источников энергии в декарбонизацию энергетики вносит древесное топливо, в первую очередь за счет активного его применения в области теплоснабжения. Вклад остальных энергоисточников в общее снижение выбросов парниковых газов значительно меньше. При детальном рассмотрении только электроэнергетики можно отметить сопоставимый вклад всех источников энергии в 2020 г., в то время как ранее существенно большее сокращение выбросов достигалось за счет гидроэнергетики. Достигнутые значения снижения выбросов парниковых газов не превышают 4 % от выбросов энергетического сектора, что, несомненно, крайне мало по сравнению с имеющимся потенциалом сокращения выбросов.

Для более интенсивного сокращения выбросов парниковых газов и вовлечения в этот процесс большего числа субъектов хозяйствования необходимы специальные инструменты. Значимое влияние сможет оказать доступность самостоятельной оценки и прогнозирования сокращения выбросов парниковых газов за счет использования возобновляемых источников энергии, перехода на экологически более чистое ископаемое топливо или экономии топлива при реализации энергосберегающих мероприятий. Важна доступность на любом уровне: как на государственном, так и на уровне небольшой компании или даже уровне индивидуального потребителя. Существующие методики оценки выбросов требуют высокой квалификации людей, проводящих оценку, глубокого понимания процессов и механизмов расчета и часто построения собственной расчетной программы. Готовые же продукты обычно затрагивают только одно узкое направление, ориентированы на конкретную страну или не учитывают полный жизненный цикл. Совокупность этих факторов делает расчет сокращения выбросов парниковых газов сложной задачей, что замедляет процессы декарбонизации энергетического сектора.

Результаты исследования и их обсуждение

С целью упрощения механизма расчета сокращения выбросов, повышения доступности расчетов на любом уровне потребления топливно-энергетических ресурсов и популяризации вопросов декарбонизации энергетики был разработан Калькулятор сокращения выбросов парниковых газов (далее –

Калькулятор) – программный продукт с интуитивно понятным интерфейсом. Механизмы расчета базируются на принятых в международном сообществе методиках и адаптированы для условий Республики Беларусь, учитывают особенности функционирования энергосистемы страны.

Алгоритм работы с Калькулятором представлен на рис. 4.

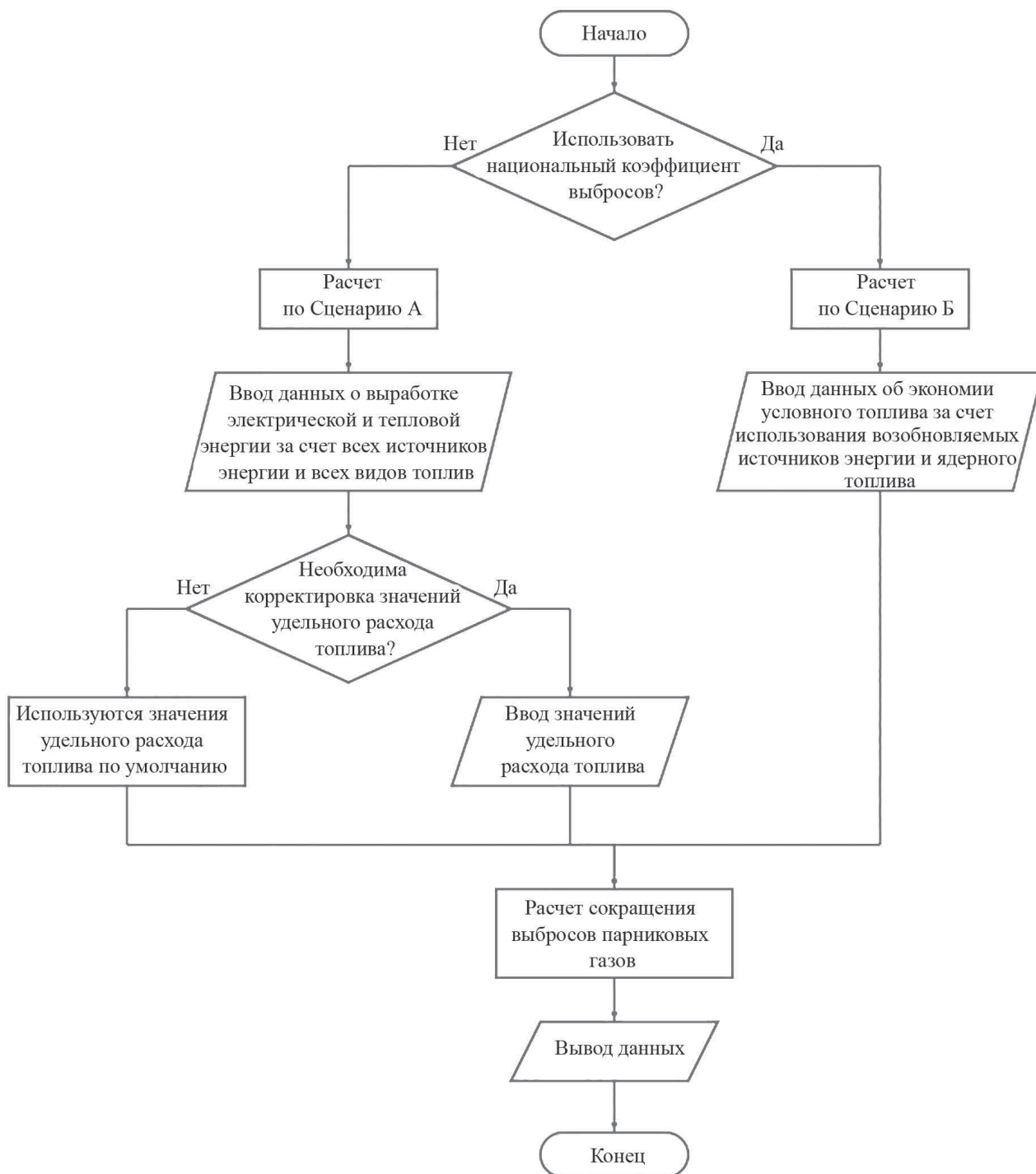


Рис. 4. Алгоритм работы с Калькулятором

Fig. 4. Algorithm for working with the Calculator

Калькулятор позволяет определить объем снижения выбросов парниковых газов при использовании возобновляемых источников энергии и ядерного топлива, заменяющих традиционные горючие ископаемые виды топлива, либо снижения выбросов за счет экономии топливно-энергетических ресурсов. Инструмент предполагает, что количество энергии, полученной от возобновляемых источников энергии или ядерного топлива, заменяет аналогичное количество энергии, произведенной за счет сжигания ископаемого топлива при существующей или заданной пользователем структуре топлив.

Расчеты могут проводиться для анализа производства отдельно электрической или тепловой энергии, а также их совокупности, что важно для Республики Беларусь, где имеется большая потребность в тепловой энергии и широко распространено централизованное теплоснабжение.

Возможно определение сокращения выбросов на полном жизненном цикле оборудования, что включает выбросы на этапе производства оборудования, его эксплуатации в течение процессов, происходящих после окончания срока службы оборудования (Универсальная методика, Сценарий А). Для расчета данного Сценария исходные данные по удельным выбросам парниковых газов для различных технологий приняты согласно данным Специального доклада о возобновляемых источниках энергии и смягчении последствий изменения климата Межправительственной группы экспертов по изменению климата [5]. В качестве базовых значений удельных выбросов выбраны медианные значения, полученные экспертами в результате анализа более чем двух тысяч источников. Базовые мировые значения были скорректированы для особенностей производства энергии в Республике Беларусь, при этом учтена комбинированная выработка электрической и тепловой энергии на теплоэлектроцентралях, позволяющая более эффективно использовать топливо и, как результат, производить меньше выбросов парниковых газов по сравнению с раздельной выработкой.

Альтернативный вариант расчета (Национальная методика, Сценарий Б) базируется на национальных выбросах парниковых газов, география которых ограничена границами государства. Такой подход позволяет оценить влияние энергетического сектора на экологию страны без учета косвенных выбросов, произведенных при, например, производстве либо доставке оборудования, а также принимает во внимание фактически производимые выбросы, которые могут несколько отличаться от медианных мировых значений. В данном Сценарии применяются национальные коэффициенты выбросов парниковых газов, определенные в [6]. В значении коэффициента уже учтена структура энергетического баланса, что упрощает их применение. Изменчивость структуры может приводить к необходимости регулярного обновления коэффициентов, однако за последнее десятилетие колебания коэффициентов от среднего значения не превышали 2 %, что делает допустимым применение средних значений. Важно отметить, что расчет по Сценарию Б без соответствующей корректировки национальных коэффициентов возможен только для Республики Беларусь и только для случая централизованного электро- и теплоснабжения в базовом варианте.

В качестве исходных данных для расчета по Сценарию А в Калькулятор должны быть введены объемы производства электрической и/или тепловой энергии, полученной за счет всех имеющихся источников энергии (рис. 5). Если производство энергии за счет сжигания ископаемых топлив остается незаполненным, либо введены значения, равные нулю, то сокращение выбросов рассчитывается по варианту замены природного газа как топлива базового варианта. Ввод отрицательных значений не допускается.

Рис. 5. Вид части окна ввода исходных данных Калькулятора

Fig. 5. View of a part of the input data window of the Calculator

Дополнительно может быть установлен удельный расход топлива на отпуск электрической и тепловой энергии, иначе используются значения, установленные по умолчанию и соответствующие рекомендациям Департамента по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь по проведению расчетов в 2023 г.². Колебания удельных расходов топлива от средних значений

²Удельные расходы топлива на отпуск электро- и теплоснабжения и потери в электро- и теплосетях, используемые в 2023 году в расчетах экономии топливно-энергетических ресурсов. URL: https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka/30230201_sprav (дата обращения: 15.05.2023).

за последние пять лет не превышают 2,5 %, в связи с чем допускается не прибегать к дополнительной корректировке данных показателей.

Полученные результаты выводятся в виде значений сокращения выбросов, а также в графическом виде (рис. 6). Дополнительно определяется доля возобновляемых источников энергии.

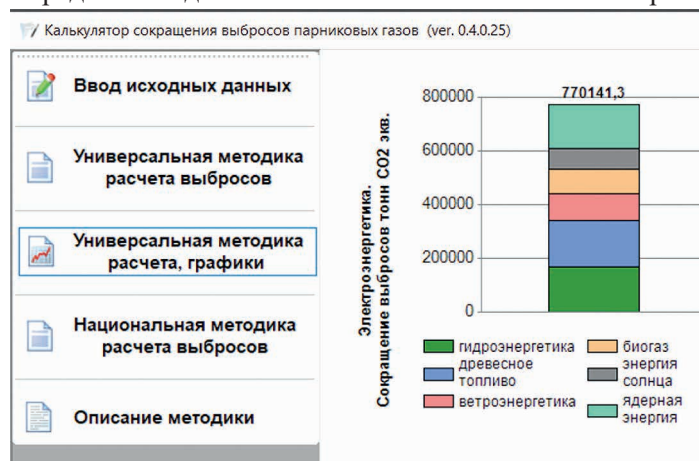


Рис. 6. Вид части окна вывода результатов расчета Калькулятора

Fig. 6. View of a part of the calculation results output window of the Calculator

Для расчета по Сценарию Б необходим ввод только объемов замещенного условного топлива за счет произведенной при помощи возобновляемых источников энергии и ядерного топлива энергии либо при реализации энергосберегающих мероприятий (рис. 7).

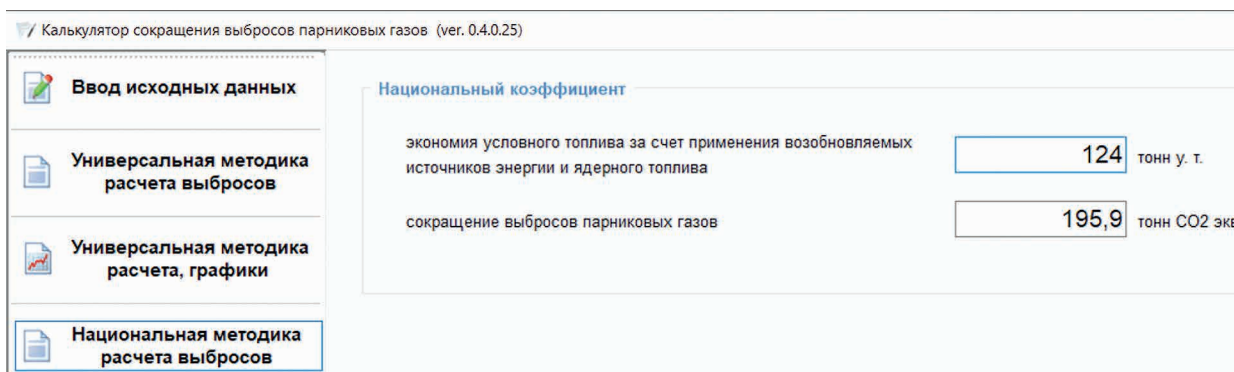


Рис. 7. Вид окна расчета с применением национального коэффициента выбросов парниковых газов

Fig. 7. View of the calculation using the national greenhouse gas emission factor window

Вычисления, производимые Калькулятором, базируются на описанной ниже методике.

При выборе Сценария А сокращение выбросов парниковых газов при выработке электрической энергии определяется по формуле:

$$\Delta GHE_w = 0,001 \cdot \sum_{i=1}^n \left(W_i \left(\sum_{j=1}^m (w_j^f \cdot ghe_j^f) - ghe_i \right) \right), \quad (1)$$

где ΔGHE_w – сокращение выбросов парниковых газов при выработке электрической энергии, тыс. т CO_2 экв.;

W_i – электроэнергия, выработанная за счет i -го вида возобновляемого источника энергии или ядерного топлива за расчетный период, млн кВт·ч;

w_j^f – доля j -го вида ископаемого горючего топлива в производстве электроэнергии за счет всех видов ископаемого горючего топлива в расчетном периоде;

ghe_j^f – удельные выбросы парниковых газов в пересчете на CO_2 эквивалент j -го вида ископаемого горючего топлива, г/кВт·ч.

ghe_i – удельные выбросы парниковых газов в пересчете на CO_2 эквивалент i -го вида возобновляемого источника энергии или ядерного топлива г/кВт·ч.

Если выработка электроэнергии за счет ископаемого горючего топлива не указана, то автоматически устанавливаются следующие значения: $j = 1$; $w_j^f = 1$; ghe_j^f устанавливается по природному газу.

Сокращение выбросов парниковых газов при производстве тепловой энергии определяется по формуле:

$$\Delta GHE_Q = \frac{4,19}{3600} \cdot \sum_{i=1}^n \left(Q_i \cdot \left(\sum_{j=1}^m (q_j^f \cdot ghe_j^f) - ghe_i \right) \cdot \frac{b_Q}{b_W \cdot 1,163} \right), \quad (2)$$

где ΔGHE_Q – сокращение выбросов парниковых газов при выработке электрической энергии, тыс. т CO_2 экв.;

Q_i – тепловая энергия, выработанная за счет i -го вида возобновляемого источника энергии или ядерного топлива за расчетный период, тыс. Гкал;

q_j^f – доля j -го вида ископаемого горючего топлива в производстве тепловой энергии за счет всех видов ископаемого горючего топлива в расчетном периоде;

b_Q – удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии, г у. т. / кВт·ч;

b_W – удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии, кг у. т. / Гкал.

По аналогии с расчетом для электрической энергии, если выработка тепловой энергии за счет ископаемого горючего топлива не указана, то автоматически устанавливаются следующие значения: $j = 1$; $q_j^f = 1$; ghe_j^f устанавливается по природному газу.

Сокращение выбросов парниковых газов за счет использования возобновляемых источников энергии или ядерного топлива определяется по формуле:

$$\Delta GHE = \Delta GHE_W + \Delta GHE_Q, \quad (3)$$

где ΔGHE – сокращение выбросов парниковых газов за счет использования возобновляемых источников энергии или ядерного топлива, тыс. т CO_2 экв.

Для удобства расчетов ввод данных может производиться в альтернативных единицах, предложенных в программе, с последующей автоматической конвертацией в необходимые для проведения вычислений единицы.

При выборе Сценария Б для вычислений необходим только ввод значения экономии условного топлива, значение сокращения выбросов парниковых газов определяется формулой:

$$\Delta GHE_N = \Delta B \cdot ghe_N, \quad (4)$$

где ΔGHE_N – сокращение выбросов парниковых газов на национальном уровне, тыс. т CO_2 экв.;

ΔB – экономия условного топлива, тыс. т у. т.;

ghe_N – национальный коэффициент выбросов парниковых газов в пересчете на CO_2 , т CO_2 экв./т у. т.

Результаты расчета по Сценарию А могут быть выведены в виде стилизованного графического изображения (рис. 8).



*Годовое сокращение выбросов парниковых газов за счет применения возобновляемых источников энергии

Рис. 8. Пример вывода результатов расчета в виде графического изображения

Fig. 8. Example of displaying calculation results in the form of a graphic image

Данное изображение впоследствии может быть использовано, например, для размещения на сайте компании или этикетке продукции с целью информирования покупателя об ответственном отношении производителя к вопросам экологии и устойчивости развития, что позитивно отразится на имидже компании.

Заключение

Отрасль энергетики оказывает значительное негативное влияние на состояние окружающей среды, в том числе та, которая производит выбросы парниковых газов. В Республике Беларусь почти две трети выбросов парниковых газов приходится именно на энергетику, что делает задачу декарбонизации отрасли особенно важной.

Увеличение доли возобновляемой и ядерной энергетики в энергобалансе страны оказывает положительное воздействие на достижение целей по декарбонизации, реализацию энергосберегающих мероприятий и повышение энергоэффективности. Наличие доступных и простых в использовании инструментов для количественной оценки сокращения выбросов парниковых газов при смене источника энергии, а также при проведении энергетической модернизации объекта позволит упростить расчеты и привлечь широкое внимание к вопросам изменения климата.

Расчет сокращения выбросов и следование по пути сокращения выбросов выбранным способом будет иметь не только очевидные эффекты в виде укрепления национальной, но и экологической безопасности. Маркировка продукции с указанием сокращения выбросов произведет социальный эффект: потребитель сможет сделать более осознанный выбор товара и внести осознанный вклад в борьбу с изменениями климата. Экономический эффект также возможен при условии развития углеродных рынков.

Библиографические ссылки

1. Кухаревич ЕИ, Василевская ЖН, Довнар ОА, и др. *Охрана окружающей среды в Республике Беларусь*. В: Медведева ИВ, редактор. *Статистический сборник*. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь; 2021.
2. ЕМЕР/ЕЕА air pollutant emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national emission inventories. ЕЕА Report. Copenhagen: European Environment Agency; 2019. doi:10.2800/293657.
3. IRENA. Global hydrogen trade to meet the 1.5 °C climate goal: Part I – Trade outlook for 2050 and way forward. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2022.
4. Любчик ОА. Роль возобновляемой энергетики в декарбонизации энергетического сектора Республики Беларусь. *Окружающая среда и энерговедение*. 2022;4(16):27–37. doi: 10.24412/2658-6703-2022-4-27-37.
5. Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, et al. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Annex II. IPCC. Cambridge: United Kingdom; New York; Cambridge University Press; 2011.
6. Мелех ДВ, Наркевич ИП. Выбросы парниковых газов при производстве электрической и тепловой энергии в Республике Беларусь. *Труды БГТУ*. 2020;2(235):205–213. <https://elib.belstu.by/handle/123456789/35226>.

References

1. Kuharevich EI, Vasilevskaya ZhN, Dovnar OA, et al. *Ohrana okruzhayushchej sredy v Respublike Belarus'* [Environmental protection in the Republic of Belarus]. In: Medvedeva IV, editor. *Statistical collection*. Minsk: National Statistical Committee of the Republic of Belarus; 2021. Russian.
2. ЕМЕР/ЕЕА air pollutant emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national emission inventories. ЕЕА Report. Copenhagen: European Environment Agency; 2019. doi:10.2800/293657.
3. IRENA. Global hydrogen trade to meet the 1.5 °C climate goal: Part I – Trade outlook for 2050 and way forward. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2022.
4. Lyubchik OA. *Rol' vozobnovlyaemoj energetiki v dekarbonizacii energeticheskogo sektora Respubliki Belarus* [The role of renewable energy in the decarbonization of the energy sector of the Republic of Belarus]. *Environment and energy science*. 2022;4(16):27–37. doi: 10.24412/2658-6703-2022-4-27-37. Russian.
5. Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, et al. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Annex II. IPCC. Cambridge: United Kingdom; New York; Cambridge University Press; 2011.
6. Melekh DV, Narkevich IP. *Vybrosov parnikovyh gazov pri proizvodstve elektricheskoy i teplovoj energii v Respublike Belarus* [Greenhouse gas emissions from electricity and heat generation in the Republic of Belarus]. *Proceedings of BSTU*. 2020;2(235):205–213. <https://elib.belstu.by/handle/123456789/35226>. Russian.

Статья поступила в редколлегию 22.04.2023.
Received by editorial board 22.04.2023.

ДИНАМИКА ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ И ПОТЕРИ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЛЯХ БЕЛАРУСИ

О. Л. ЛОМОНОС¹⁾, М. М. ЛОМОНОС²⁾

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

²⁾ИООО «Рапуль Бел»,
ул. Рождественская, 5А, 223043, д. Цнянка, Минский район, Минская область, Беларусь

В исследовании приведены результаты сравнительного анализа статистических данных Национального статистического комитета Республики Беларусь за пятилетний период (2017–2021 гг.) по внесению минеральных удобрений на сельскохозяйственных землях Беларуси, рассчитаны и представлены потери основных элементов питания (азота, фосфора, калия) при их применении. Произведен расчет продуктивности сельскохозяйственных культур, на основании чего установлены показатели выноса элементов питания с урожаем. Определена разница между приходной и расходной частями элементов питания с целью оценки влияния вносимых минеральных удобрений на окружающую среду. Согласно представленным данным, наблюдается снижение внесения минеральных удобрений по сравнению с предыдущим периодом (2012–2016 гг.) на 59 кг/га д. в. Расчет структуры статей расхода азота в среднем по республике за 2017–2021 гг. показывает, что значительная часть азота (72 % от общего количества) идет на формирование урожайности сельскохозяйственных культур, а оставшееся его количество составляют газообразные потери (21 %), потери от выщелачивания (6 %) и эрозии почв (1 %). Практически весь фосфор, вносимый с удобрениями, используется сельскохозяйственными культурами для формирования урожая и лишь незначительная его часть теряется в результате эрозионных процессов (0,1–0,4 кг/га). Потери калия составляют 10 %, из которых 9 % теряется в результате выщелачивания. Задача современного земледелия состоит в оптимизации и повышении эффективности использования минеральных удобрений, что снизит риски их негативного влияния на экологическую обстановку. Строгое соблюдение технологических рекомендаций по их применению будет способствовать предотвращению нарушения равновесия экосистемы.

Ключевые слова: минеральные удобрения; газообразные потери; выщелачивание; эрозионные потери; экология; окружающая среда.

DYNAMICS OF FERTILIZER APPLICATION AND NUTRITION LOSS ON AGRICULTURAL LAND IN BELARUS

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

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

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

Образец цитирования:

Ломонос ОЛ, Ломонос ММ. Динамика применения удобрений и потери элементов питания на сельскохозяйственных землях Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;2:96–104.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-96-104>

For citation:

Lamanos VL, Lamanos MM. Dynamics of fertilizer application and nutrition loss on agricultural land in Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;2:96–104. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-96-104>

Авторы:

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

Authors:

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

The article presents the results of a comparative analysis of the statistical data of the National Statistical Committee of the Republic of Belarus for a five-year period (2017–2021) on the application of mineral fertilizers on the agricultural lands of Belarus, calculated and presented the losses of the main nutrients (nitrogen, phosphorus, potassium) during their application. The calculation of the productivity of agricultural crops was made, on the basis of which the indicators of the removal of nutrients with the harvest were established. The calculation of the productivity of agricultural crops was made, on the basis of which the indicators of the removal of nutrients with the harvest were established. The difference between the incoming and outgoing parts of the fertilizer elements was determined to assess the effect of applied mineral fertilizers on the environment. According to the presented data, there is a decrease in the application of mineral fertilizers compared to the previous period (2012–2016) by 59 kg/ha a.i. Calculation of the structure of nitrogen flowrate items on average in the republic for 2017–2021 shows that a significant part of nitrogen (72 % of the total amount) is used to form crop yields, and the remaining amount is gaseous losses (21 %), losses from leaching (6 %) and soil erosion (1 %). Almost all of the phosphorus applied with fertilizers is used by crops to form crops, and only a small part of it is lost as a result of erosion processes (0.1–0.4 kg/ha). Potassium losses are 10 %, of which 9 % is lost as a result of leaching. Strict observance of the conditions of transportation, storage, mixing of fertilizers, optimization of the use of mineral fertilizers based on scientifically based recommendations will ensure their efficient use and thus significantly reduce the risks of negative effect of fertilizers on the environment. Strict adherence to technological recommendations for their application will help prevent ecosystem imbalance.

Keywords: mineral fertilizers; gaseous losses; leaching; erosive losses; ecology; environment.

Введение

Острой экологической проблемой современности, имеющей глобальный характер, является ухудшение качества окружающей среды. Если ранее это наблюдалось в основном в районах с развитой промышленностью, то в настоящее время экологический кризис очень быстро охватывает значительную часть аграрных территорий. С одной стороны, в решении продовольственного вопроса, увеличения объемов высокопродуктивного производства растениеводческой и животноводческой продукции, важная роль отводится индустриально-технологическим формам земледелия, а с другой – они же являются причиной ухудшения среды обитания человека.

В Беларуси задача повышения экономической и экологической эффективности использования земельных ресурсов и удобрений имеет первостепенное значение. Почвенный покров отличается пестротой по гранулометрическому составу, увлажнению и уровню плодородия [1]. Погодные условия в период вегетации растений характеризуются значительной неустойчивостью: запасы почвенной влаги колеблются от избыточного до критического уровня. Поэтому в современных агротехнологиях, не умаляя важности таких приемов, как обработка почвы, выбор сорта (гибрида), система защиты растений, особое внимание необходимо уделять повышению эффективности использования удобрений, за счет которых формируется 35–45 % и более общей урожайности, улучшается качество продукции и устойчивость сельскохозяйственных культур к неблагоприятным погодным условиям [2].

Мировая и отечественная практика интенсивного земледелия убедительно показывает, что удобрения – это материальная основа количества и качества получаемой растениеводческой продукции, источник биогенных элементов для растений. Научно обоснованная система применения минеральных и органических удобрений позволяет решать задачи расширенного воспроизводства плодородия почв, бездефицитного или положительного баланса биогенных элементов и гумуса в системе «почва – растение – удобрение», получение растениеводческой продукции, сбалансированной по химическому составу и питательной ценности, повышения рентабельности сельскохозяйственного производства [3; 4]. Ежегодно в мире для повышения плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур в составе минеральных удобрений вносится около 60 млн т азота, фосфора и калия и 4–5 млн т пестицидов [5].

В то же время применение удобрений и других средств химизации – это весьма активное влияние на природную среду. В настоящее время в индустриально развитых странах, а также в ряде регионов нашей страны применяются достаточно высокие дозы минеральных удобрений, поэтому их влияние на окружающую среду требует пристального внимания с целью повышения эффективности мер по охране природы, внедрению научно обоснованных систем ведения сельского хозяйства и прогрессивных технологий.

Растения сельскохозяйственных культур в первый год действия усваивают (в среднем) из удобрений 15–20 % фосфора, 50–60 % калия, 60–70 % азота [6]. В то же время оставшаяся их часть выходит за пределы пахотных земель и загрязняет объекты окружающей среды. Вследствие несовершенства самих удобрений и нарушений технологий их использования, каждый год фактические потери минеральных удобрений по республике достигают 15 %, что в пересчете на физический вес составляет более 600 тыс. т в год [5].

Последствия таких процессов зависят от вида минеральных удобрений. Так, систематическое внесение физиологически кислых удобрений, особенно азотных, приводит к повышению кислотности почв, а продолжительное использование удобрений одного класса способствует накоплению в грунтах анионных остатков (хлоридов, сульфатов и т. д.).

Современный ассортимент азотных удобрений в республике представлен в основном, карбамидом (мочевиной), КАС, сульфатом аммония и аммиачной селитрой. Практически весь ассортимент фосфорных удобрений реализуется в форме комплексных удобрений (аммонизированный суперфосфат, аммофос, сульфоаммофос и др.) и комплексных азотно-фосфорно-калийных удобрений. В ассортименте калийных удобрений основное место занимает хлористый калий. В небольших количествах используется сульфат калия (около 1 %) и 1,5–2,0 % калия поступает в виде комплексных удобрений [7].

Нарушение научно обоснованной агрономической технологии применения удобрений (доз, сочетаний, способов, сроков внесения, форм удобрений) также является существенным источником их потерь и загрязнения окружающей среды. Вместе с тем расширенное воспроизводство плодородия почв невозможно без системного применения минеральных удобрений. Система их применения в Беларуси предусматривает компенсацию выноса элементов питания с урожаем и должна обеспечивать постепенное повышение запасов в почвах гумуса и элементов минерального питания растений до оптимального уровня [1].

Цель исследования – проведение сравнительного анализа статистических данных по динамике применения минеральных удобрений на сельскохозяйственных землях Беларуси в 2017–2021 гг. и оценка потерь основных элементов питания.

Материалы и методы исследования

Предмет и объект исследований – минеральные удобрения (азотные, фосфорные, калийные), сельскохозяйственные земли.

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

При расчете приходной и расходной статей баланса элементов питания по областям и республике использовали данные из отчета Национального статистического комитета Республики Беларусь за 2017–2021 гг. [8]:

- внесение минеральных удобрений (в пересчете на 100 % питательных веществ) в сельскохозяйственных организациях Республики Беларусь;
- внесение органических удобрений в сельскохозяйственных организациях по областям;
- валовый сбор и урожайность сельскохозяйственных культур в сельскохозяйственных организациях по областям;
- посевные площади сельскохозяйственных культур в сельскохозяйственных организациях по областям.

Расчет структуры приходной и расходной статей элементов питания рассчитывали в соответствии с методикой расчета баланса элементов питания в земледелии Республики Беларусь [9]. При пересчете валовых сборов (тыс. т) в кормовые единицы применяли коэффициенты для пересчета продукции растениеводства в кормовые единицы [7].

Результаты исследования и их обсуждение

По данным Национального статистического комитета Республики Беларусь, применение минеральных удобрений на сельскохозяйственных землях в 2017–2021 гг. составило 173 кг действующего вещества на гектар (кг д. в./га) (табл. 1).

Таблица 1

Внесение минеральных и органических удобрений под сельскохозяйственные культуры в сельскохозяйственных организациях Республики Беларусь, среднее за 2017–2021 гг.

Table 1

Application of mineral and organic fertilizers for agricultural crops in agricultural organizations of the Republic of Belarus, average for 2017–2021

Область	NPK	В том числе			Органические удобрения
		азотные	фосфорные	калийные	
кг д.в./га					т/га
Брестская	221	94	23	104	15,4
Витебская	95	50	9	36	5,4
Гомельская	170	79	19	72	8,4
Гродненская	231	106	22	103	11,5
Минская	184	83	23	78	10,6
Могилевская	136	65	13	58	7,7
Республика Беларусь	173	79	19	75	9,8

Данный показатель существенно различается по областям, изменяясь от 95 кг д. в./га в Витебской обл. до 231 кг д. в./га – в Гродненской.

Важным аспектом применения минеральных удобрений является их сбалансированность. В процентном соотношении наибольшую долю минеральных удобрений по республике составляли азотные удобрения – 45,7 %, почти на этом же уровне калийные – 43,4 %, а фосфорные лишь 11,0 %. Наибольшее количество азотных удобрений вносилось на сельскохозяйственных землях Гродненской обл. – 106 кг д. в. / га, наименьшее в Витебской – 50 кг д. в./га. Количество используемых фосфорных удобрений во всех областях минимальное – от 9 кг д. в./ га в Витебской обл. до 23 кг д. в./га в Брестской и Минской обл. По количеству вносимых калийных удобрений лидировали Брестская и Гродненская области – 104 и 103 кг д. в. / га соответственно.

Сравнивая объемы применения минеральных удобрений за предыдущий период (2012–2016 гг.) следует отметить их снижение на 59 кг д. в./га NPK (рис. 1).

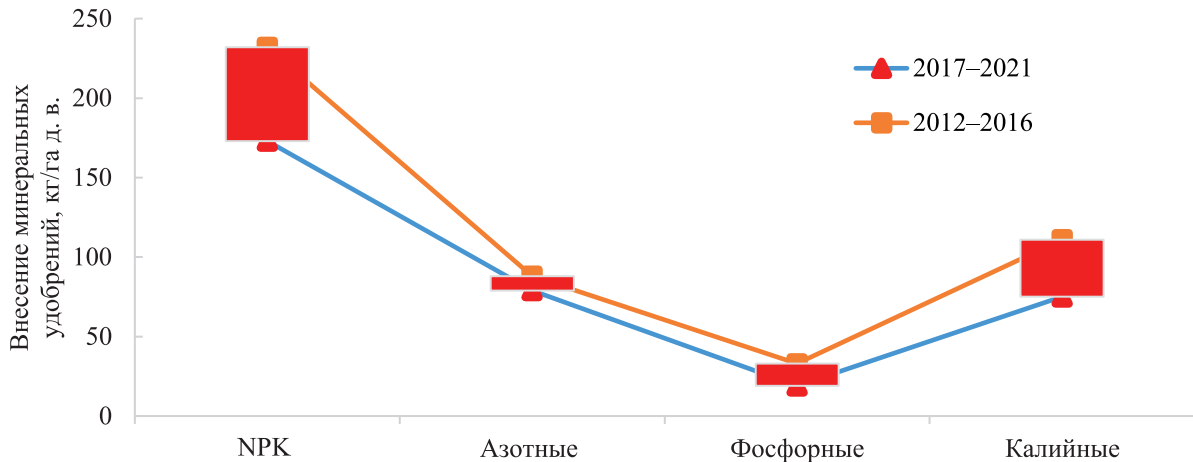


Рис. 1. Динамика применения минеральных удобрений под сельскохозяйственные культуры в Беларуси за период 2012–2016 и 2017–2021 гг., кг д. в./га

Fig. 1. Dynamics of the application of mineral fertilizers for agricultural crops in Belarus for the period 2012–2016 and 2017–2021, kg a. i./ha

При этом внесение азотных удобрений снизилось на 9 кг д. в./га, фосфорных – на 14 и больше всего калийных – на 36 кг д. в./га. Вместе с тем ежегодная потребность в минеральных удобрениях по расчетам Института почвоведения и агрохимии на период до 2025 г. составляет 1808 тыс. т д. в., в том числе 671 азотных, 331 фосфорных, 806 тыс. т д. в. калийных удобрений [10], что предполагает рост применения минеральных удобрений в ближайшей перспективе, а значит более внимательное отношение к соблюдению экологических норм при их применении.

Азоту принадлежит ведущая роль в повышении урожайности сельскохозяйственных культур, особенно в условиях дерново-подзолистых почв Беларуси. Однако роль азотных удобрений в питании растений не ограничивается их непосредственным усвоением корневой системой. Азот удобрений активно включается в общий биологический цикл, участвуя в биохимических, физико-химических и химических процессах, происходящих в органической и минеральной частях почвы. Результатом этих превращений является изменение химического состава почвы и сопредельных с ней сред. Поэтому для повышения эффективности и экологической безопасности использования азотных удобрений к данному элементу необходимо относиться особенно внимательно.

Азот в почве вследствие микробиологических процессов в конечном счете накапливается в виде окисленной формы – нитратов (NO_3) [11; 12]. Эта его форма очень подвижна, поэтому нитраты легко смываются с поверхности почвы, мигрируют по профилю до грунтовых вод, загрязняя их и водоемы. Высокое содержание нитратов в почве приводит также к повышенному их накоплению в растениях, что снижает качество растениеводческой продукции и является небезопасным для человека.

Значительная часть нитратов в процессе денитрификации восстанавливается до N_2O и молекулярного азота (N_2), сопровождается газообразными потерями в атмосферу [13].

В связи с этим важно обеспечить контроль непродуктивных потерь азота при применении азотных удобрений под сельскохозяйственные культуры с целью оценки их влияния на окружающую среду. Калькуляция расходных статей азота состоит из выноса с урожаем, потерями от выщелачивания, газообразными потерями, потерями в результате эрозии почвы. Расчет структуры статей расхода азота в среднем по республике за 2017–2021 гг. показывает, что его значительная часть (72 % от общего количества) идет на

формирование урожайности сельскохозяйственных культур, а оставшееся количество (28 %) составляют потери данного элемента питания (рис. 2).



Рис. 2. Структура статей расхода азота в Республике Беларусь, среднее за 2017–2021 гг.

Fig. 2. Structure of nitrogen flowrate items in the Republic of Belarus, average for 2017–2021

Из общего количества потерь азота значительная его часть сопровождается газообразными потерями в атмосферу – 21 %. Потери от выщелачивания составляют 6 %, в результате эрозии – 1 %.

Анализ абсолютных значений использования азота на формирование урожая и его непродуктивных потерь по областям Беларуси указывает на более высокий уровень его газообразных потерь в условиях Брестской (36,3 кг/га) и Гродненской (36,0 кг/га д. в.) областей, что связано с внесением наибольшего количества азотных удобрений в этих регионах, по сравнению с другими (рис. 3). Максимальные потери азота в результате выщелачивания наблюдаются в Брестской 10,4 кг/га (23 %) и Гомельской 10,1 кг/га (26 %) областях, что вызвано более высокой долей легких по гранулометрическому составу почв. Потери от эрозии в зависимости от области находятся в диапазоне 0,5–1,8 кг/га и не превышают 2 % от объема внесенных азотных удобрений.

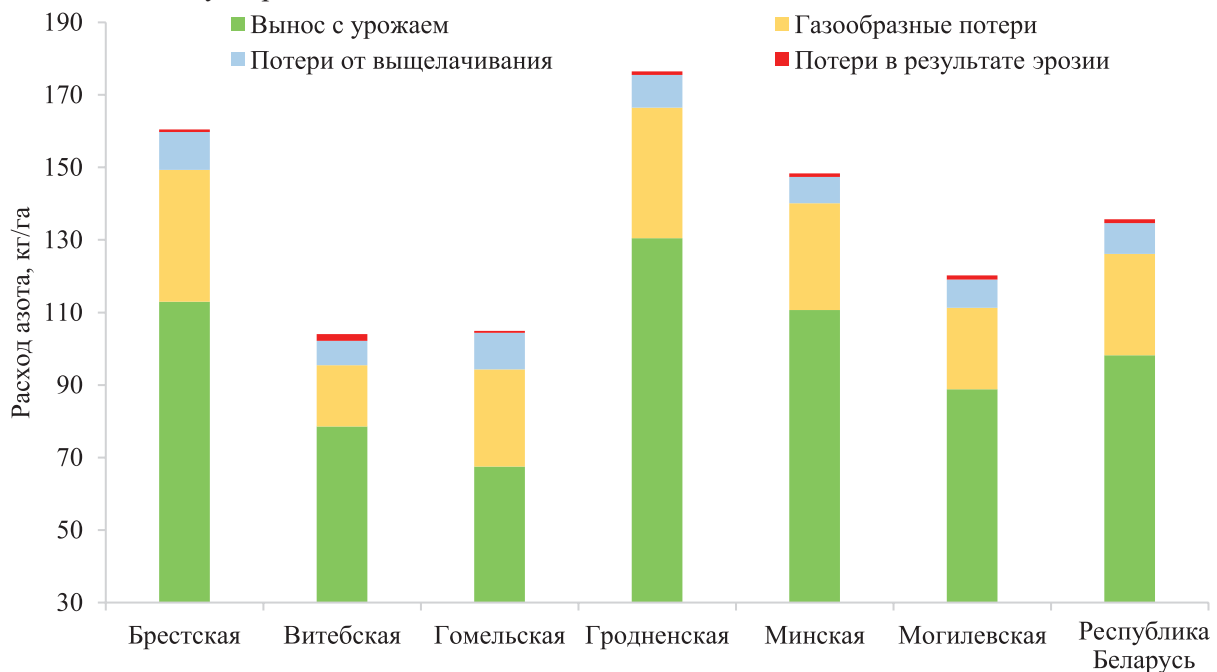


Рис. 3. Статьи расхода азота, кг/га

Fig. 3. Nitrogen flowrate items, kg/ha

Фосфор как биогенный элемент меньше теряется в окружающую среду вследствие малой его подвижности в почве и не представляет такой экологической опасности, как азот. От других биогенных элементов фосфор отличается отсутствием газообразных соединений и тем, что большинство фосфатов плохо растворимы. Данный элемент практически не вымывается из почвы (до 0,2 кг/га в год) [6]. Тем не менее, значительное количество соединений фосфора ежегодно теряется вследствие смыва фосфорных удобрений с полей под воздействием эрозионных процессов. Наибольшие эрозионные потери фосфора составили в Витебской и Могилевской областях и достигали 0,4 кг/га, минимальные в Брестской и Гомельской – 0,1 кг/га (рис. 4). Оставшееся количество фосфора, внесенного в виде удобрений, идет на формирование урожайности сельскохозяйственных культур.

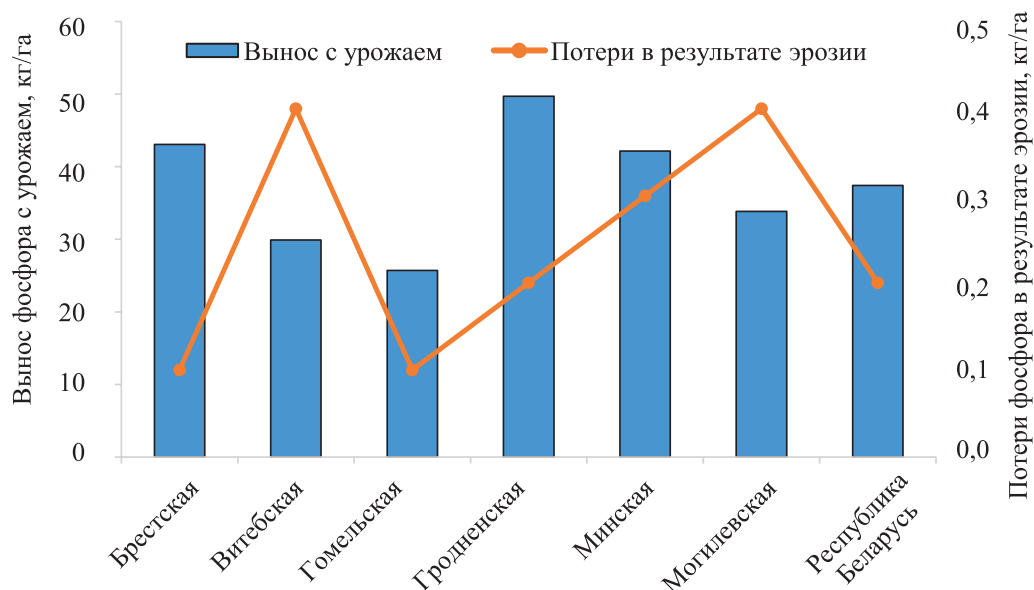


Рис. 4. Статьи расхода фосфора в среднем за 2017–2021 гг., кг/га

Fig. 4. Phosphorus flowrate items on average for 2017–2021, kg/ha

Максимальные показатели использования фосфора для формирования урожайности установлены в Гродненской, Брестской и Минской областях. Величина выноса фосфора с урожаем в данных регионах находится в пределах от 42,2 кг/га в Минской обл. до 49,7 кг/га в Гродненской.

Потери калия более значительны, чем фосфора. Именно минеральные удобрения – основной и самый главный источник загрязнения водоемов калием. Его усредненные потери от выщелачивания в Беларуси составили 8,8–9,8 кг/га или 7–13 % всех расходных статей, а в результате эрозии – 0,2–1,0 кг/га (рис. 5).

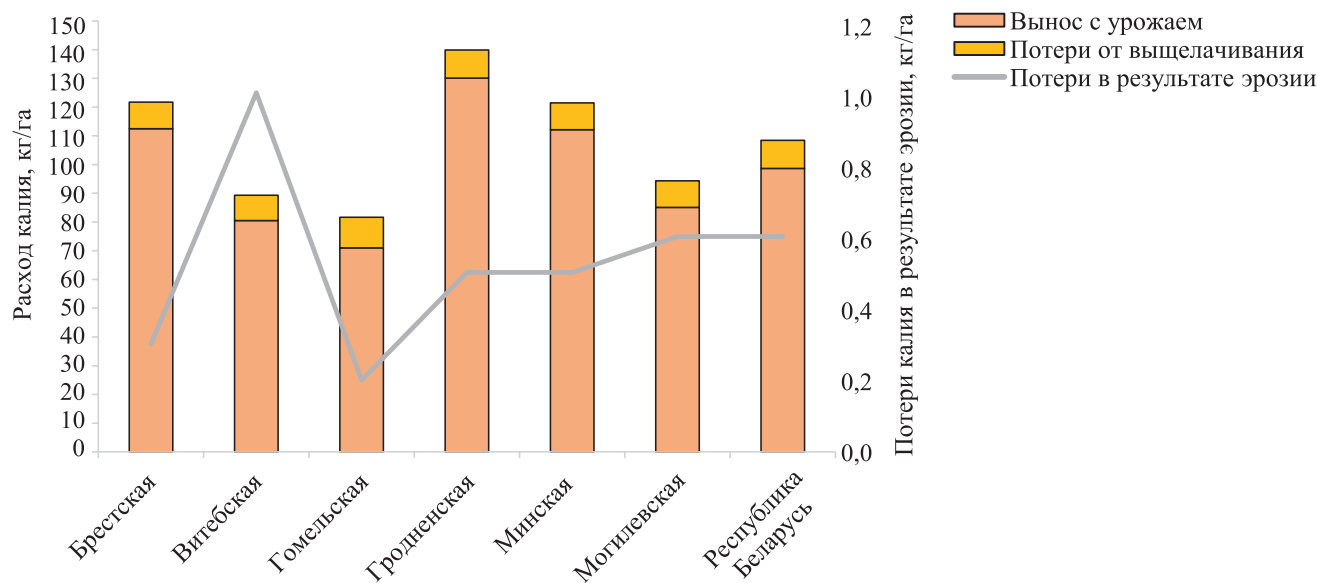


Рис. 5. Статьи расхода калия в среднем за 2017–2021 гг., кг/га

Fig. 5. Potassium flowrate items on average for 2017–2021, kg/ha

Среди областей более значительные потери калия 10,7 кг/га наблюдаются в Гомельской обл., что в большей степени связано с высокой долей в структуре посевных площадей легких по гранулометрическому составу почв. Но стоит отметить, что в данной области наименьшие эрозионные потери из почв. В среднем по Беларуси потери калия в результате эрозии составляют 0,6 кг/га, а от выщелачивания 9,7 кг/га.

В целом же в условиях Беларуси значительная часть калия (около 91 %) идет на формирование урожайности сельскохозяйственных культур (рис. 6). Непродуктивные потери составляют не более 10 %, в том числе 9 % калия теряется в результате выщелачивания и 1 % вследствие эрозии.

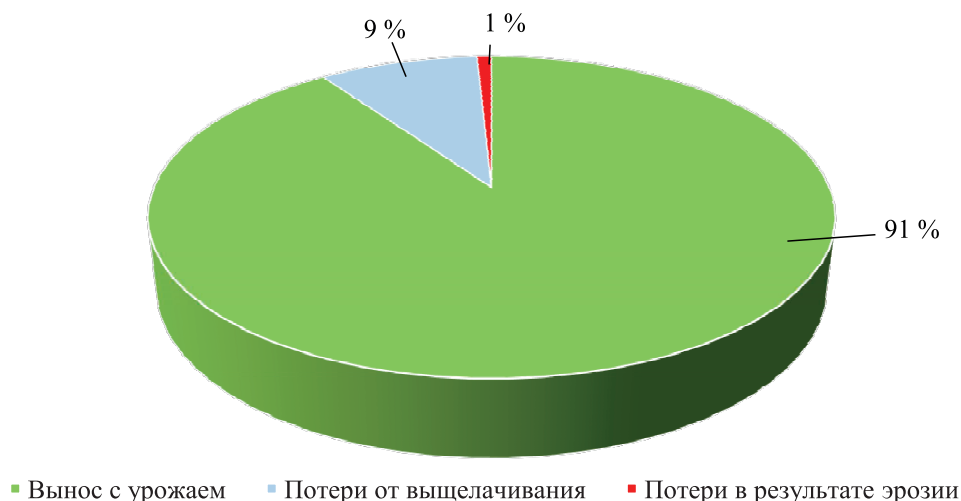


Рис. 6. Структура статей расхода калия в Республике Беларусь, среднее за 2017–2021 гг.

Fig. 6. Structure of potassium flowrate items in the Republic of Belarus, average for 2017–2021

Баланс питательных веществ в системе «почва – растение – удобрение» составляет часть общего процесса взаимодействия элементов и относится к малому биологическому круговороту. Показатели баланса отражают пути превращения и расхода питательных веществ минеральных и органических удобрений, долю элементов питания, продуктивно используемую и отчуждаемую растениями из почвы и восполняемую за счет минеральных и органических удобрений [14]. Оценка разницы между приходными и расходными статьями элементов питания (азота, фосфора и калия) свидетельствует, что со снижением применения минеральных и органических удобрений, а также с ростом продуктивности за счет эффективного использования других элементов технологии возделывания сельскохозяйственных культур (высокопродуктивные сорта или гибриды, средства защиты растений и т. д.) в большинстве регионов Беларуси отмечается отрицательный баланс элементов питания, указывающий на то, что существующий уровень применения удобрений не может обеспечить воспроизводство плодородия почв, так как их основная часть при внесении идет на формирование урожая сельскохозяйственных культур, что практически исключает рост непродуктивных потерь элементов питания (рис. 7).

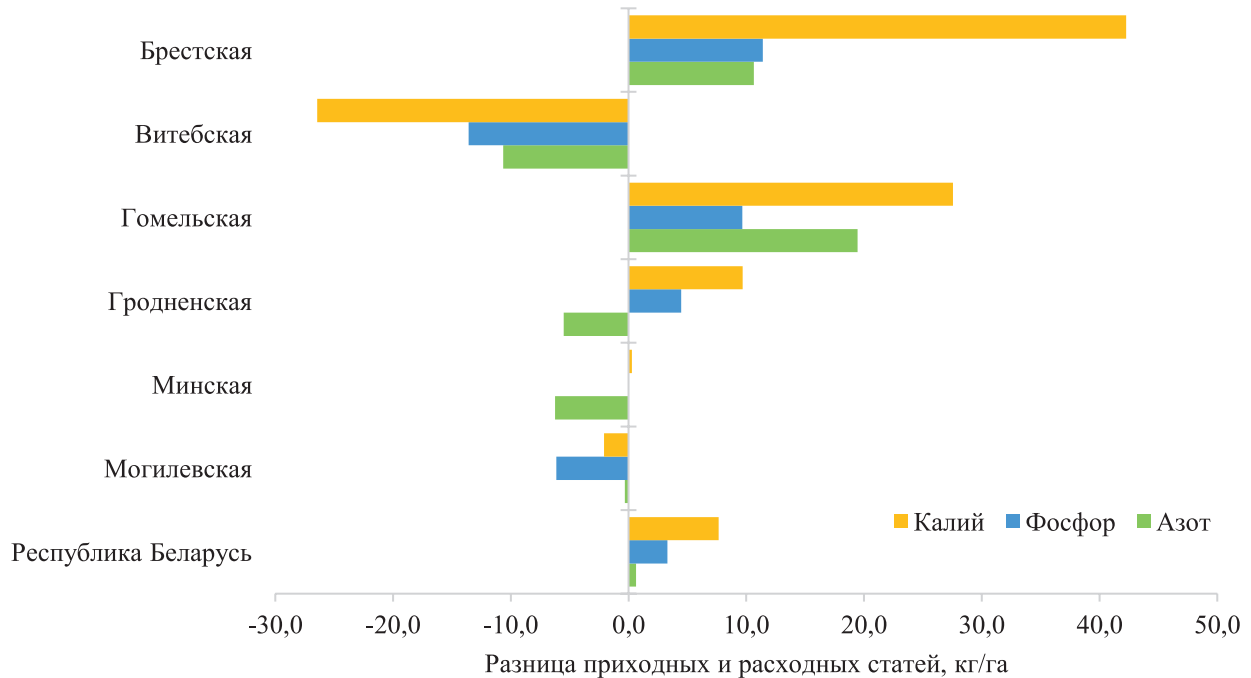


Рис. 7. Разница между приходными и расходными статьями элементов питания за 2017–2021 гг.

Fig. 7. The difference between the income and expense items of fertilizer element for 2017–2021

Минимизировать непродуктивные потери элементов питания и снизить негативное влияние минеральных удобрений на окружающую среду позволит комплекс мероприятий.

1. Усиление роли органических удобрений (ежегодно применять в среднем 12,5 т/га пашни) [15].
2. Увеличение доли промежуточных культур, используемых на зеленое удобрение (люпин, озимая рожь, горчица, рапс, редька масличная и др.).
3. Увеличение в структуре посевных площадей зернобобовых культур (кормовые бобы, горох, люпин, соя) и многолетних бобовых трав (люцерна, клевер и др.), что позволит обогатить почву биологическим азотом, снизить объем вносимых азотных удобрений и тем самым уменьшить их негативное влияние на окружающую среду.
4. Внесение комплексных минеральных удобрений с заданным соотношением элементов питания в зависимости от биологических особенностей культуры, уровня плодородия почв, с добавками микроэлементов и регуляторов роста.
5. Использование азотных удобрений пролонгированного действия, позволяющее избежать непродуктивных потерь азота (карбамид с полимерным покрытием, карбамид с фосфатным покрытием, сульфат аммония с полимерным покрытием и др.).
6. Внесение минеральных удобрений локальным способом, что снижает потери элементов питания и повышает эффективность их использования при формировании урожая.
7. Соблюдение в системах земледелия научно обоснованных севооборотов, позволяющее снизить внесение минеральных удобрений за счет создания оптимально-минимальной системы удобрения, адаптированной к условиям окружающей среды.
8. Использование технологии точного земледелия для дозированного внесения минеральных удобрений, учитывающей содержание элементов питания в почве и потребность культур в этих элементах.

Заключение

За 2017–2021 гг. применение минеральных удобрений по Республике Беларусь снижено по сравнению с предыдущим периодом (2012–2016 гг.) на 59 кг/га д. в. и было недостаточным как для реализации потенциала сельскохозяйственных культур, так и для повышения содержания элементов питания в почвах, на что указывает отрицательный баланс элементов питания в большинстве регионов страны. Расчет структуры статей расхода азота в среднем по республике за указанный период свидетельствует, что основная его часть (72 % от общего количества) идет на формирование урожайности сельскохозяйственных культур. Оставшееся количество азота составляют газообразные потери (21 %), потери от выщелачивания (6 %) и эрозии почв (1 %). Практически весь фосфор (25,7–49,7 кг/га), вносимый с удобрениями, используется

сельскохозяйственными культурами для формирования урожая, однако незначительная его часть теряется в результате эрозионных процессов (0,1–0,4 кг/га). Потери калия составляют 10 %, из которых 9 % теряется в результате выщелачивания, 1 % вследствие эрозионных процессов.

Библиографические ссылки

1. Богдевич ИМ, и др. *Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь (2017–2020 гг.)*. Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси; 2022. 276 с.
2. Семененко НН. *Инновационные технологии применения азотных удобрений: теория, методология, практика*. Минск: Альфа-книга; 2020. 320 с.
3. Минеев ВГ. *Агрохимия. 2-е издание*. Москва: Издательство МГУ, Издательство «КолосС»; 2004. 720 с.
4. Цыганов АР, Вильдфлуш ИР, Персикова ТФ. *Экологические проблемы агрохимии*. Минск: Учебно-методический центр Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь; 1997. 75 с.
5. Мисун ЛВ, Мисун ИН, Гришук ВМ. *Инженерная экология в АПК*. Минск: БГАТУ; 2007. 302 с.
6. Лапа ВВ, и др. *Система применения удобрений*. Гродно: ГГАУ; 2011. 418 с.
7. Лапа ВВ, и др. *Справочник агрохимика*. Минск: ИВЦ Минфина; 2021. 260 с.
8. *Сельское хозяйство Республики Беларусь*. Минск: Информационно-вычислительный центр Национального статистического комитета Республики Беларусь; 2022. 36 с.
9. Лапа ВВ, и др. *Методика расчета баланса элементов питания в земледелии Республики Беларусь*. Минск: БНИВНФХ в АПК; 2007. 24 с.
10. Лапа ВВ, и др. *Комплекс мероприятий по повышению плодородия и защите от деградации почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь на 2021–2025 гг.* Минск: ИВЦ Минфина; 2021. 148 с.
11. Юркин СН, Благовещенская ЗК, Макаров НБ, Пименов ЕА. *Потери элементов питания в земледелии и охрана окружающей среды*. Москва: ВАСХНИЛ; 1978. 52 с.
12. Пироговская ГВ. *Поступление, потери элементов питания растений в системе «атмосферные осадки – почва – удобрение – растение»*. Минск: Беларуская навука; 2018. 227 с.
13. Минеев ВГ. *Химизация земледелия и природная среда*. Москва: Агропромиздат; 1990. 287 с.
14. Лапа ВВ, Иващенко НН, Баланс азота, фосфора и калия и применение удобрений на почвах пахотных земель Беларуси. *Vesti NAS of Belarus. Series of agricultural sciences*. 2017;2:48–57.
15. Серая ТМ, Богатырева ЕН, Кирдун ТМ, Жабровская НЮ. Виды органических удобрений и методика расчета их потребности для обеспечения бездефицитного баланса гумуса в пахотных почвах. *Почвоведение и агрохимия*. 2022;2(69):37–56.

References

1. Bogdevich IM, et al. *Agrohimicheskaja harakteristika pochv sel'skhozajstvennyh zemel' Respubliki Belarus' (2017–2020 gg.)* [Agrochemical characteristics of soils of agricultural lands of the Republic of Belarus (2017–2020)]. Minsk: Institute for System Research in the Agroindustrial Complex of the National Academy of Sciences of Belarus; 2022. 276 p. Russian.
2. Semenenko NN. *Innovacionnyje tehnologii primenenija azotnyh udobrenij: teorija, metodologija, praktika* [Innovative technologies for the use of nitrogen fertilizers: theory, methodology, practice]. Minsk: Al'fa-kniga; 2020. 320 p. Russian.
3. Mineev VG. *Agrohimija. 2-e izdanie* [Agrochemistry. 2nd edition]. Moscow: Izdatel'stvo MGU, Izdatel'stvo «KolosS»; 2004. 720 p. Russian.
4. Tsyganov AR, Vil'dflush IR, Persikova TF. *Jekologicheskie problemy agrohimii* [Ecological problems of agrochemistry]. Minsk: Uchebno-metodicheskij centr Ministerstva sel'skogo hozjajstva i prodovol'stviya Respubliki Belarus'; 1997. 75 p. Russian.
5. Misun LV, Misun IN, Grischuk VM. *Inzhenernaja jekologija v APK* [Engineering ecology in the agro-industrial complex]. Minsk: BGATU; 2007. 302 p. Russian.
6. Lapa VV, et al. *Sistema primenenija udobrenij* [Fertilizer application system]. Grodno: GGAU; 2011. 418 p. Russian.
7. Lapa VV, et al. *Spravochnik agrohimika* [Handbook of an agrochemist]. Minsk: IVC Minfina; 2021. 260 p. Russian.
8. *Sel'skoe hozjajstvo Respubliki Belarus'* [Agriculture of the Republic of Belarus]. Minsk: Informacionno-vychislitel'nyj centr Nacional'nogo statisticheskogo komiteta Respubliki Belarus; 2022. 36 p. Russian.
9. Lapa VV, et al. *Metodika rascheta balansa jelementov pitaniya v zemledelii Respubliki Belarus'* [Methodology for calculating the balance of nutrients in agriculture of the Republic of Belarus]. Minsk: BNIVNFH v APK; 2007. 24 p. Russian.
10. Lapa VV, et al. *Kompleks meroprijatij po povysheniju plodorodija i zashhite ot degradacii pochv sel'skhozajstvennyh zemel' Respubliki Belarus' na 2021–2025 gg.* [A set of measures to improve fertility and protect agricultural lands from soil degradation in the Republic of Belarus for 2021–2025]. Minsk: IVC Minfina; 2021. 148 p. Russian.
11. Jurkin SN, Blagoveschenskaja ZK, Makarov NB, Pimenov EA. *Poteri jelementov pitaniya v zemledelii i ohrana okruzhajushhej sredy* [Losses of nutrients in agriculture and environmental protection.]. Moscow: VASHNIL; 1978. 52 p. Russian.
12. Pirogovskaya GV. *Postuplenie, poteri jelementov pitaniya rastenij v sisteme «atmosfernye osadki – pochva – udobrenie – rastenie»* [Income, losses of plant nutrients in the «atmospheric precipitation – soil – fertilizer – plant» system]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2018. 227 p. Russian.
13. Mineev VG. *Himizacija zemledelija i prirodnaja sreda* [Chemicalization of agriculture and natural environment]. Moscow: Agropromizdat; 1990. 287 p. Russian.
14. Lapa VV, Ivahnenko NN, *Balans azota, fosfora i kalija i primenenie udobrenij na pochvah pahotnyh zemel' Belarusi* [The balance of nitrogen, phosphorus and potassium and the use of fertilizers on soils of arable land in Belarus]. *Vesti NAS of Belarus. Series of agricultural sciences*. 2017;2:48–57. Russian.
15. Seraya TM, Bogatireva EN, Kirdun TM, Zhabrovskaya NYu. *Vidy organicheskikh udobrenij i metodika rascheta ih potrebnosti dlja obespechenija bezdeficitnogo balansa gumusa v pahotnyh pochvah* [Types of organic fertilizers and a method for calculating their needs to ensure a deficit-free balance of humus in arable soils]. *Soil science and agrochemistry*. 2022;2(69):37–56. Russian.

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Макаренко Т. В., Хаданович А. В., Пырх О. В., Попичева Е. А.</i> Накопление меди и марганца в системе «дно – моллюски» в водоемах г. Гомеля и на прилегающих территориях	4
<i>Малькова И. Л., Рубцова И. Ю., Семакина А. В., Петухова Л. Н.</i> Особенности проявления клещевых инфекций в отдельных регионах Российской Федерации в связи с глобальным потеплением климата	16
<i>Жоров Д. Г., Воробьева М. М.</i> Экологические особенности и ДНК-штрихкодирование чужеродных видов Arhidoidea, включенных в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси.....	25
<i>Бонина Т. А., Мазец Ж. Э., Прохоцкая Н. С.</i> Комплексная оценка экологического состояния урбоэкосистемы г. Слуцка	40

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Атрошко М. А., Литвяк В. В., Шахаб С. Н., Кравченко В. А., Батян А. Н.</i> Квантово-химическое моделирование радиационно-индуцированной деструкции крахмала	48
<i>Кляус В. В., Жукова О. М., Гусейнова Д. И., Бабич Е. А.</i> Метод оценки доз облучения персонала и населения в результате ингаляционного поступления радионуклидов при пожарах на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.....	57

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Савицкая Т. В.</i> Полиморфизм генов <i>MDR1</i> , <i>MTHFR</i> , <i>GSTM1</i> , <i>GSTT1</i> и предрасположенность к развитию острого лейкоза у детей	68
---	----

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Самусик Е. А., Головатый С. Е.</i> Реакция пигментной системы древесных растений на газопылевое загрязнение	78
<i>Любчик О. А.</i> Декарбонизация энергетического сектора: разработка Калькулятора сокращения выбросов парниковых газов	87
<i>Ломонос О. Л., Ломонос М. М.</i> Динамика применения удобрений и потери элементов питания на сельскохозяйственных землях Беларуси.....	96

CONTENTS

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Makarenko T. V., Khadanovich A. V., Pyrkh O. V., Popicheva E. A.</i> Features of copper and manganese accumulation in the system «bottom – mollusks» of reservoirs of the city of Gomel and adjacent territories	4
<i>Malkova I. L., Rubtsova I. Ju., Semakina A. V., Petuhova L. N.</i> Features of the manifestation of tic-born infections in certain regions of the Russian Federation in connection with global climate warming	16
<i>Zhorov D. G., Varabyova M. M.</i> Ecological characteristics and DNA barcoding of alien Aphidoidea species included in the Black book of invasive animal species of Belarus	25
<i>Bonina T. A., Mazets Zh. E., Prakhotskaya N. S.</i> Comprehensive assessment of the urban ecosystem ecological state of the city of Slutsk.....	40

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Atroshko M. A., Lityyak V. V., Shahab S. N., Kravchenko V. A., Batyan A. N.</i> Quantum-chemical simulation of radiation-induced destruction of starch.	48
<i>Kliaus V. V., Zhukova O. M., Huseinava D. I., Babich A. A.</i> Method for dose assessment to workers and public as a result of inhalation intake of radionuclides during fires at the territories with a high level of radioactive contamination	57

MEDICAL ECOLOGY

<i>Savitskaya T. V.</i> Polymorphism of <i>MDR1</i> , <i>MTHFR</i> , <i>GSTM1</i> , <i>GSTT1</i> genes and predisposition to development of childhood acute leukemia.....	68
---	----

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Samusik E. A., Golovatyi S. E.</i> Reaction of the pigment system woody plants for gas and dust pollution.....	78
<i>Liubchik V. A.</i> Energy sector decarbonization: avoided greenhouse gas emissions Calculator developing.....	87
<i>Lamanos V. L., Lamanos M. M.</i> Dynamics of fertilizer application and nutrition loss on agricultural land in Belarus	96

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.
№ 2. 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 27.06.2023.
Тираж 100 экз. Заказ 239.

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. 2. 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 27.06.2023.
Edition 100 copies. Order number 239.

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