



ЖУРНАЛ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ЭКОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

ECOLOGY

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

4

2024

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

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

**Заместитель
главного
редактора**

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

**Ответственный
секретарь**

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

Батян А. Н.

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

Головатый С. Е.

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

Голубев А. П.

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

Гричик В. В.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Дардынская И. В.

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

Дзятковская Е. Н.

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

Дроздович В. В.

Национальный институт рака, США, Бетесда.

Зафранская М. М.

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

Кильчевский А. В.

Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Коноплев А. В.

Институт радиоактивности окружающей среды университета г. Фукусима, Япония.

Коровин Ю. А.

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

Ленгфельдер Э.

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

Либерамос Г.

Афинский технический университет, Афины, Греция.

Линге И. И.

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

Лукашенко С. Н.

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

Логинов В. Ф.

Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Медведев С. В.

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

Набиев И. Р.

Реймский университет, Франция, Реймс.

Степанов С. А.

Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Россия.

Стожаров А. Н.

Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь.

Тарутин И. Г.

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

EDITORIAL BOARD

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

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 551.582.1.583.1

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В БЕЛОРУССКОМ СЕКТОРЕ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

С. А. КАЛИНИЧЕНКО¹⁾, Ю. Д. МАРЧЕНКО¹⁾, В. Е. БЕЛАШ¹⁾

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

За период многолетних инструментальных наблюдений (1997–2022 гг.) на исследовательской станции «Масаны» отмечено увеличение количества ясных дней и снижение дней, относящихся к полужасным (переменной облачности). Среднегодовое значение интенсивности суммарной солнечной радиации (энергетической освещенности) в реальных условиях облачности составило 0,21 кВт/м² с интервалом варьирования по годам от 0,18 до 0,25 кВт/м². Наибольшая интенсивность лучистой энергии в годовом ходе приходится на июль (0,37 кВт/м²), а минимальным количеством энергии отличался декабрь (0,04 кВт/м²). Среднегодовая температура воздуха за 1997–2022 гг. увеличилась на 0,46 °С по отношению к среднему многолетнему значению (7,7 °С), принятому для ближайшего населенного пункта (г. Брагин) и на 0,76 °С по отношению к среднему многолетнему значению (7,4 °С), принятому для Гомельской обл.

Образец цитирования:

Калиниченко СА, Марченко ЮД, Белаш ВЕ. Тенденции изменения климата в белорусском секторе ближней зоны Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;4:4–17.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-4-17>

For citation:

Kalinichenko SA, Marchenko YuD, Belash VE. Climate change trends in the belarusian sector of exclusion zone of the Chernobyl NPP. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;4:4–17. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-4-17>

Авторы:

Сергей Александрович Калиниченко – кандидат биологических наук, доцент; заведующий лабораторией спектрометрии и радиохимии.

Юрий Дмитриевич Марченко – заведующий отделом радиационно-экологического мониторинга.

Виктор Евгеньевич Белаш – специалист 1 категории отдела радиационно-экологического мониторинга.

Authors:

Sergey A. Kalinichenko, PhD (biology), docent; head of the laboratory of spectrometry and radiochemistry.

s-a-k@list.ru

Yuri D. Marchenko, head of the department of radioecological monitoring.

umd66@yandex.by

Victor E. Belash, 1st category specialist at the department of radioecological monitoring.

belash.vitya@list.ru

Абсолютный максимум (+39,5 °C) для наших наблюдений был зарегистрирован в 2015 г., абсолютный минимум – в 2012 г. (–34,4 °C). Наблюдается характерная положительная динамика увеличения среднегодовой температуры приземного воздуха около 0,06 °C/год. Отмечено снижение количества дней со снежным покровом. Возросло число жарких и сухих дней. На рассматриваемой территории в среднем за год выпадает 593,7 мм атмосферных осадков. Число дней с осадками составляет ≈ 128 (35,1 %). Коэффициент увлажнения, по Иванову, в различные годы варьировал от 0,5 до 1,4. Наблюдается положительная тенденция увеличения количества осадков около 0,4 мм/год. Средняя высота снежного покрова составила 6 см. Количество дней со снежным покровом с годами имеет явную тенденцию к снижению. Относительная влажность воздуха за 1997–2022 гг. в среднем составила 78 %. Средняя сумма активных температур в ближней зоне аварии на ЧАЭС – 2842 °C.

Ключевые слова: изменения климата; климатические характеристики; зона отчуждения ЧАЭС.

Благодарность. Авторы выражают признательность сотрудникам исследовательской станции «Масаны» им. В. Н. Фёдорова, проводивших на ней исследования и мониторинговые наблюдения многие годы.

CLIMATE CHANGE TRENDS IN THE BELARUSIAN SECTOR OF EXCLUSION ZONE OF THE CHERNOBYL NPP

S. A. KALINICHENKO^a, Yu. D. MARCHENKO^a, V. E. BELASH^a

^aPolesie State Radioecological Reserve,
7 Tserashkova Street, Khoyniki 247618, Gomel region, Belarus
Corresponding author: S. A. Kalinichenko (s-a-k@list.ru)

Our studies over the period of long-term instrumental observations (1997–2022) at the Masany research station noted increase in the number of clear days and a decrease in the number of days classified as semi-clear (partly cloudy). The average annual value of the intensity of total solar radiation (energy illumination) in real cloudy conditions was 0.21 kW/m² with an interval of variation over the years from 0.18 to 0.25 kW/m². The highest intensity of radiant energy in the annual cycle occurs in July (0.37 kW/m²), and the minimum amount of energy was observed in December (0.04 kW/m²). Average annual air temperature for the period 1997–2022 increased by 0.36 °C in relation to the long-term average value (7.7 °C) adopted for the nearest settlement (Bragin) and by 0.76 °C in relation to the long-term average value (7.4 °C), adopted for the Gomel region. The absolute maximum (+39.5 °C) for our observations was recorded in 2015, the absolute minimum in 2012 (–34.4 °C). There is a characteristic positive dynamics of increase in the average annual surface air temperature of about 0.06 °C/year. There was a decrease in the number of days with snow cover. The number of hot and dry days has increased. On average, 593.7 mm of precipitation falls per year on the territory under consideration. The average number of days with precipitation is 128 (35.1%). The moisture coefficient according to Ivanov in various years ranged from 0.5 to 1.4. There is a positive trend of increasing precipitation of about 0.4 mm/year. The average depth of snow cover was 6 cm. The number of days with snow cover has a clear downward trend over the years. Relative air humidity for the period 1997–2022 the average was 78 %. The average sum of active temperatures in the near zone of the Chernobyl accident was 2842 °C.

Keywords: climate change; climate characteristics; exclusion zone of the CNPP.

Acknowledgments. The authors express deep gratitude to employees of the Masany research station named after V. N. Fedorov, who conducted research and monitoring observations here for many years.

Введение

Постоянные изменения климатических характеристик состояния атмосферы: облачность, давление, температурный, влажностный и ветровой режимы являются результатом атмосферных процессов и определяют погоду и климат на данной местности. Распределение значений метеорологических величин на рассматриваемой территории определяется главным образом ее рельефом и ландшафтными особенностями, размерами и удалением водных объектов. Крупные массивы лесов и болот распространяют свое влияние на большую территорию [1–4].

Географическое распределение метеорологических элементов в настоящее время изучено более подробно, чем их изменения во времени [5]. Данные мониторинга государственной гидрометеорологической службы Республики Беларусь и результаты исследований белорусских ученых Национальной академии наук Беларуси указывают на существенные изменения в настоящее время климатических условий на территории Беларуси и сохранение этих тенденций в ближайшие годы [6].

Изучение изменения климатических условий является неотъемлемой частью комплексной оценки состояния различных компонентов биogeоценозов в ближней зоне Чернобыльской АЭС, а также играет большую роль при анализе перераспределения радионуклидов по компонентам природно-территориальных комплексов, которые на данной территории имеют некоторые особенности, характеризующиеся рядом параметров. На более ранних этапах исследований нами были изучены особенности климатических условий территории белорусского сектора ближней зоны Чернобыльской АЭС [7–9]. В данной работе ставилась задача проанализировать многолетнюю динамику изменения климата и оценить временные флуктуации климатических характеристик за весь период инструментальных наблюдений на территории белорусского сектора зоны отчуждения.

Материалы и методы исследования

Комплекс инструментальных измерений и визуальных оценок метеорологических величин и их характеристик производился в соответствии с ТКП «Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила проведения приземных метеорологических наблюдений и работ на станциях»¹. Анализ первичных метеорологических величин (значения приземной температуры воздуха и почвы, влажность, атмосферное давление, направление и скорость ветра, количество атмосферных осадков и ряд других величин и их характеристик), полученных в результате непрерывных приземных метеорологических инструментальных наблюдений на метеорологической площадке исследовательской станции «Масаны» Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, являющейся самой южной из всех метеостанций нашей страны, был проведен за 26-летний период (1997–2022 гг.). Данный временной интервал позволил выявить тенденции временной динамики климатических характеристик и провести оценку современных климатических условий. Изучены тенденции сроков наступления пороговых значений температур и других метеорологических величин, их характеристики, отражающие изменение климата территории ближней зоны ЧАЭС в целях дальнейшего определения региональных особенностей климатических условий. Для анализа современных климатических изменений на территории заповедника использованы суточные, среднемесячные, годовые, экстремальные значения температуры и влажности воздуха, количества осадков, на основе которых вычисляли даты перехода температуры воздуха через 0; 5; 10; 15 °C и продолжительность периодов с пороговыми значениями указанных температур, суммы температур воздуха выше 5 и 10 °C, число сухих дней (с относительной влажностью воздуха 30 % и менее, хотя бы в один из сроков наблюдений), количество жарких дней (с максимальной температурой воздуха +25 °C и выше). Станция «Масаны» включена в Государственный реестр производителей гидрометеорологической информации 4.04.2019 г., в работе использованы поверенные приборы и оборудование. Обработка и анализ материалов, построение рисунков, таблиц выполнено с применением программного пакета *MS Office Excel*.

Результаты исследования и их обсуждение

Облачность. Существенное значение на состояние атмосферы оказывает облачность (количество облаков). В любом месте повторяемость ясной и пасмурной погоды определяется режимом облачности, который в основном формируется под влиянием циркуляционных процессов (в холодный период года) и в результате воздействия подстилающей поверхности (в теплый период года). Они влияют на приход солнечной радиации к земной поверхности и, следовательно, на температурный режим. По результатам сравнения за последний пятилетний период (2018–2022 гг.) наблюдений количество пасмурных дней, когда облака покрывали 80 и более процентов видимого пространства небосвода (8–10 баллов по общей облачности), увеличилось на 8 % по сравнению со средним многолетним значением и в долевого распределении составило 41 % (рис. 1).

За последний пятилетний цикл наблюдалось увеличение количества ясных дней, а число дней, относящихся к полужасным (переменной облачности), снизилось. Наибольшей облачностью отличались зимние месяцы декабрь и январь, что является характерной особенностью для данного региона. Большинство ясных дней приходилось на апрель, август и сентябрь.

Среднегодовое значение интенсивности суммарной солнечной радиации (энергетической освещенности) было более подробно проанализировано за период 2001–2015 гг. и в реальных условиях облачности составило 0,21 кВт/м² с интервалом варьирования по годам от 0,18 до 0,25 кВт/м².

¹ ТКП 17.10-18-2009. Правила проведения проверки приземных метеорологических наблюдений и работ на станциях. Утвержден постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды от 24.12.2009 г. № 11-Т. Минск: Минприроды, 2009. 78 с.

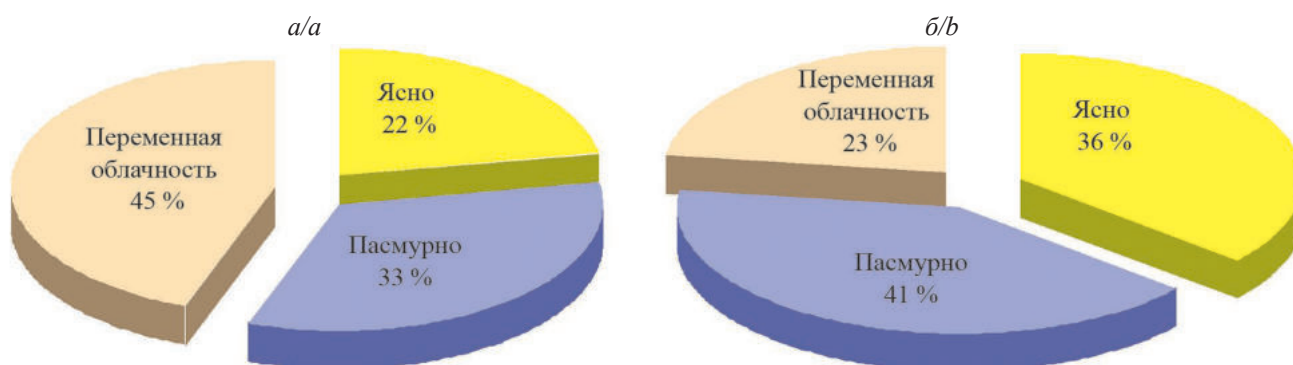


Рис. 1. Облачность: а) 1997–2022 гг., б) 2018–2022 гг., %

Fig. 1. Cloudiness: а) 1997–2022, б) 2018–2022, %

Наибольшими значениями интенсивности суммарной солнечной радиации отличались летние, а наименьшими зимние месяцы. Наибольшей интенсивностью лучистой энергии в годовом ходе характеризовался июль ($0,37 \text{ кВт/м}^2$) с интервалом варьирования по годам от $0,21$ до $0,52 \text{ кВт/м}^2$, а минимальным количеством энергии отличался декабрь ($0,04 \text{ кВт/м}^2$) с интервалом варьирования по годам от $0,02$ до $0,06 \text{ кВт/м}^2$, что ниже порога интенсивности ($0,12 \text{ кВт/м}^2$) прямой радиации на перпендикулярную поверхность, начиная с которого отмечается солнечное сияние (рис. 2).

Среднегодовые значения, полученные в течение всего периода наблюдений, в реальных условиях облачности колебались в пределах $0,18$ – $0,25 \text{ кВт/м}^2$ [5]. Количество энергетической освещенности (интенсивности) потока радиации зависит от высоты солнца (влияние времени года), местных погодных условий (облачность, туманы, дожди) и прозрачности атмосферы.

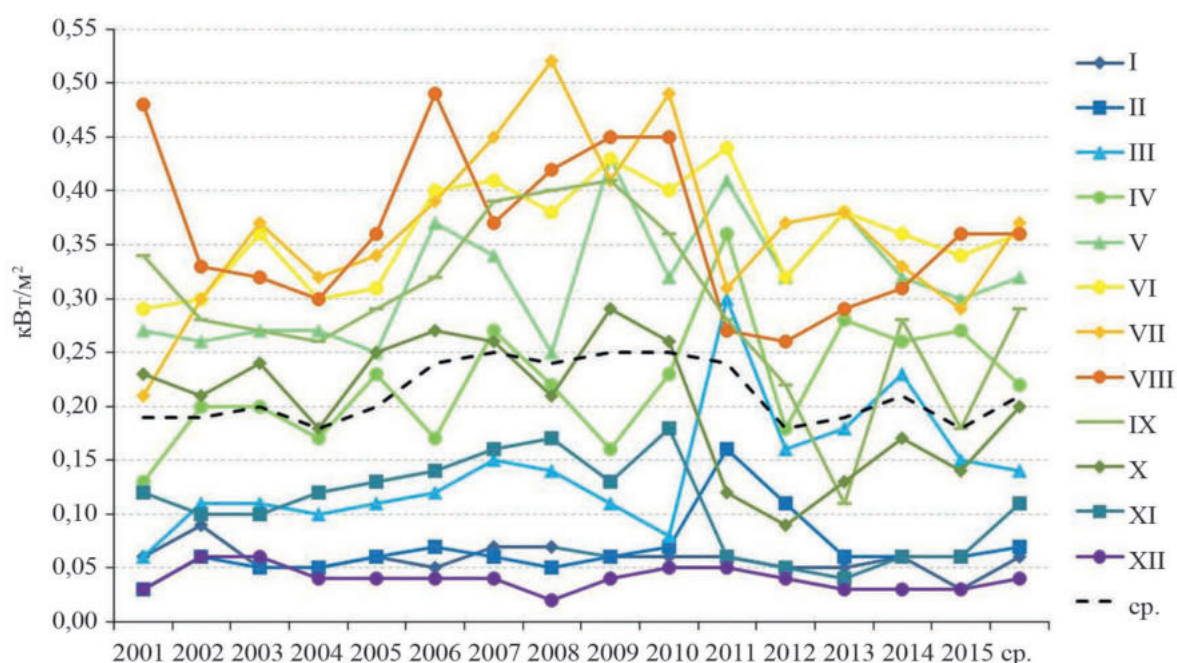


Рис. 2. Интенсивность суммарной солнечной радиации (2001–2015 гг.), кВт/м²

Fig. 2. Change in the intensity of total solar radiation (2001–2015), kW/m²

К лету увеличивается высота солнца и уменьшается облачность. Резкое изменение значений в весенне-осенний период интенсивности суммарной солнечной радиации связано с тем, что два основных фактора ее определяющих, облачность и высота солнца, действуют в одну сторону.

Температурный режим. Непериодические нарушения суточного и годового хода, обусловленные вторжениями теплых или холодных воздушных масс, искажают нормальный ход температуры воздуха [10]. Оценка изменения температур приземного воздуха проведена на основе сравнения данных ежегодных наблюдений со средними многолетними значениями, полученными за весь период инструментальных наблюдений. Анализ многолетних инструментальных исследований свидетельствует, что среднегодовая

температура воздуха за период 1997–2022 гг. увеличилась на 0,46 °C по отношению к среднему многолетнему значению (7,7 °C), принятому для ближайшего населенного пункта (г. Брагин) и на 0,76 °C по отношению к среднему многолетнему значению (7,4 °C), принятому для Гомельской обл. (рис. 3).

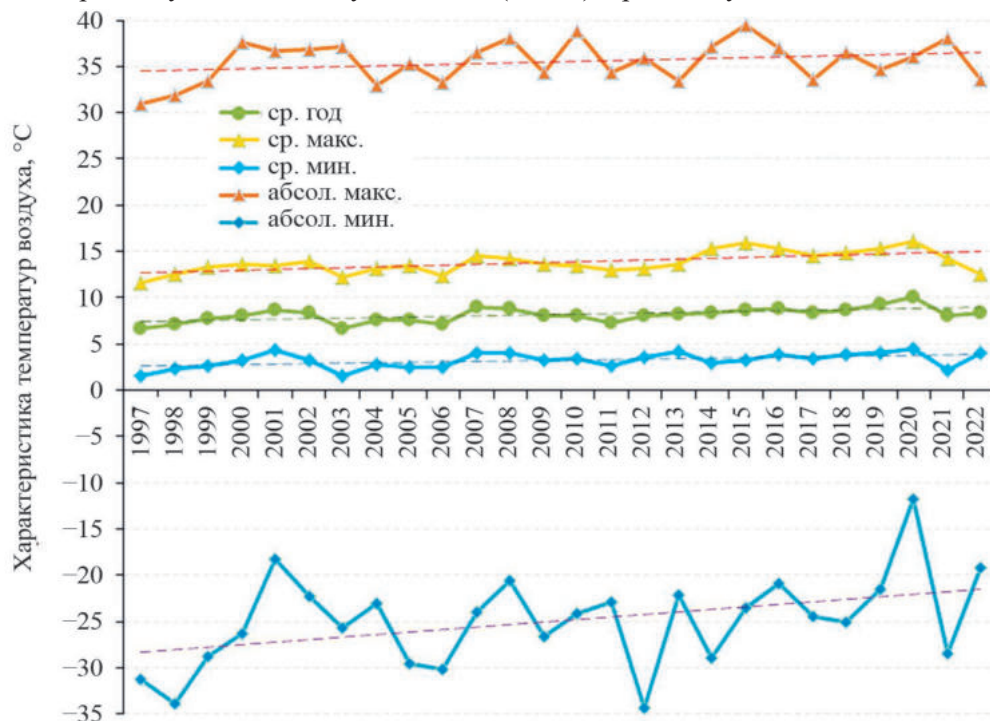


Рис. 3. Динамика температуры воздуха (1997–2022 гг.), °C

Fig. 3. Dynamics of air temperature (1997–2022), °C

Наибольшие отклонения в сторону увеличения температур от средних многолетних значений отмечались в 2020 г., когда среднегодовая температура воздуха оказалась выше «нормы» на 1,8 °C. Абсолютный максимум (+39,5 °C) в наших наблюдениях был зарегистрирован в 2015 г. Данная величина на 0,6 °C оказалась выше абсолютного максимума температуры воздуха (38,9 °C), который за весь период инструментальных наблюдений в Беларуси и Гомельской обл. был зафиксирован в августе 2010 г. на станции Гомель.

Амплитуда колебания среднегодовых температур за весь период наших инструментальных наблюдений составила 10,6 °C, экстремальных температур – 60,4 °C. За данный период был зафиксирован и абсолютный минимум температуры. В феврале 2012 г. температура снизилась до отметки минус –34,4 °C, что на 0,6 °C меньше самой низкой наблюдаемой температуры воздуха, которая была отмечена в 1998 г. и составляла минус –33,8 °C.

Основные статистические характеристики среднемесячных значений температуры приземного воздуха (ТПВ) в ближней зоне аварии на ЧАЭС для отдельных месяцев и года позволяют анализировать одновременно внутригодовую и межгодовую изменчивость ТПВ [11; 12]. Следует отметить, что температура воздуха имеет довольно хорошо выраженный годовой ход, обусловленный годовым притоком солнечной радиации. Максимальные значения её наблюдаются в июле, а минимальные – в январе (табл. 1).

Годовой ход размаха колебаний ТПВ наибольший в холодный период (8,4–15,3 °C), наименьший с апреля по октябрь (5,1–7,2 °C) в теплый период. Годовой ход среднего квадратического отклонения (σ) ТПВ почти повторяет годовой ход величины R (размаха колебаний). Аналогичный характер годового хода в средних арифметических значениях и среднеквадратических отклонениях (σ) обуславливает небольшой разброс коэффициента вариации (C) в течение всего года. Наибольшая межгодовая изменчивость ТПВ наблюдается в зимние месяцы и в марте, в остальные месяцы года невелика, различие между максимальным (декабрь) и минимальным (июль, август) коэффициентом вариации составляет 1,51.

В распределении коэффициентов асимметрии (As) наблюдаются как положительные, так и отрицательные значения. Преобладание положительных значений в теплый период означает, что временной ряд включает немногочисленные, но большие по величине положительные отклонения, и более многочисленные, но менее значительные отрицательные отклонения.

Таблица 1

Статистические оценки среднемесячных значений ТПВ, °С

Table 1

Statistical estimates of average monthly values of surface air temperature, °C

Месяц	ср.	Ме	σ ,	C	X_{max} ,	X_{min} ,	R	As	Ex
I	-3,9	-4,2	2,8	0,71	1,1	-10,6	11,7	-0,29	0,33
II	-2,8	-2,5	3,6	1,29	3,1	-12,2	15,3	-0,64	0,42
III	1,9	1,9	2,5	1,31	5,8	-2,6	8,4	-0,26	-0,93
IV	8,9	8,9	1,6	0,18	11,9	4,7	7,2	-0,57	1,35
V	14,8	14,7	1,9	0,13	17,9	11,5	6,4	0,04	-0,86
VI	18,6	18,4	1,7	0,09	22,5	16,1	6,4	0,62	-0,06
VII	20,3	20,0	1,4	0,07	23,4	18,2	5,2	0,78	0,16
VIII	18,9	18,8	1,3	0,07	22,0	16,5	5,5	0,16	0,73
IX	13,5	13,4	1,3	0,10	15,9	10,8	5,1	0,00	0,19
X	7,4	7,4	1,7	0,23	11,3	4,7	6,6	0,32	-0,33
XI	2,3	2,6	2,2	0,98	6,1	-4,2	10,3	-0,87	2,07
XII	-2,1	-1,2	3,3	1,58	2,4	-9,5	11,9	-0,73	-0,26
Среднегодовая	8,2	8,2	0,8	0,09	9,8	6,6	3,2	0,24	0,12

Из данных табл. 1 следует, что при положительных значениях As оценки среднего превышают оценки медианы на 0,1–0,3 °С. При $As < 0$ средние арифметические значения по выборке должны быть меньше медианы. Но поскольку отрицательные оценки As невелики, то данное условие за холодный период отмечается только в ноябре и декабре. В распределении коэффициентов эксцесса (Ex) преобладают положительные значения. Это означает, что эмпирическая кривая распределения является более островершинной по сравнению с нормальной кривой. Значительный ($Ex > 1$) положительный эксцесс наблюдается в апреле и ноябре.

Средняя годовая температура является общей характеристикой температурного режима, которая позволяет получить представление о температурном фоне и проследить температурные изменения во времени [10]. Для анализа современных тенденций изменения среднегодовой температуры воздуха проведена ее оценка с помощью линейного тренда (рис. 4). При анализе полученных результатов наблюдается характерная положительная динамика увеличения среднегодовой температуры приземного воздуха около 0,06 °С/год.

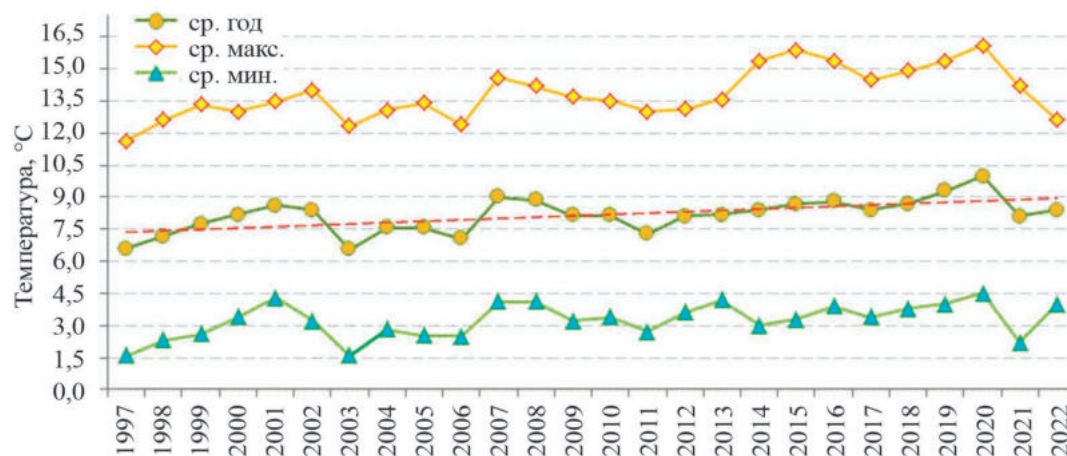


Рис. 4. Изменение температуры приземного воздуха, °С

Fig. 4. Change in surface air temperature, °C

В силу своего географического положения территория Белорусского сектора ближней зоны ЧАЭС характеризуется высокой теплообеспеченностью и продолжительностью вегетационного периода. В данном регионе, как и на всей территории страны [5; 10], отмечаются заметные изменения, связанные в первую очередь с ростом температуры воздуха как в зимний, так и летний периоды (табл. 2).

Таблица 2

Динамика климатических ресурсов (1997–2022 гг.)

Table 2

Dynamics of climate resources (1997–2022)

Основные характеристики		Среднее за период 1997–2022 гг.
Средняя температура воздуха за месяц, °C	Самый теплый (июль)	20,4
	Самый холодный (январь)	-4,0
Продолжительность периода (дни) со средней суточной температурой воздуха и выше	0 °C	286
	+5 °C	219
	+10 °C	166
	+15 °C	111
Число дней со снежным покровом		73
Число сухих дней (с относительной влажностью воздуха 30 % и менее хотя бы в один из сроков наблюдений)		21
Сумма температур за вегетационный период выше и равной	+5 °C	3234
	+10 °C	2842
Количество жарких дней (с максимальной температурой воздуха +25 °C и выше)		77
Количество осадков, мм	годовое	594
	За теплый период (апрель – октябрь)	404

Наблюдается рост сумм температур воздуха за вегетационный период выше 5 °C и продолжительность периода с пороговыми значениями данных температур. Отмечено снижение количества дней со снежным покровом. Число дней со снежным покровом может изменяться от 16 дней (2020 г.) до 129 (2013 г.). В настоящее время в среднем составляет 73 дня. Количество жарких и сухих дней с 1997 г. значительно прибавилось. Число сухих дней за период активной вегетации (май – август) в 2022 г. по региону увеличилось на 7. Наибольший рост жарких дней произошел в 2018 г. (рис. 5). В то же время практически не изменилось число сухих дней.

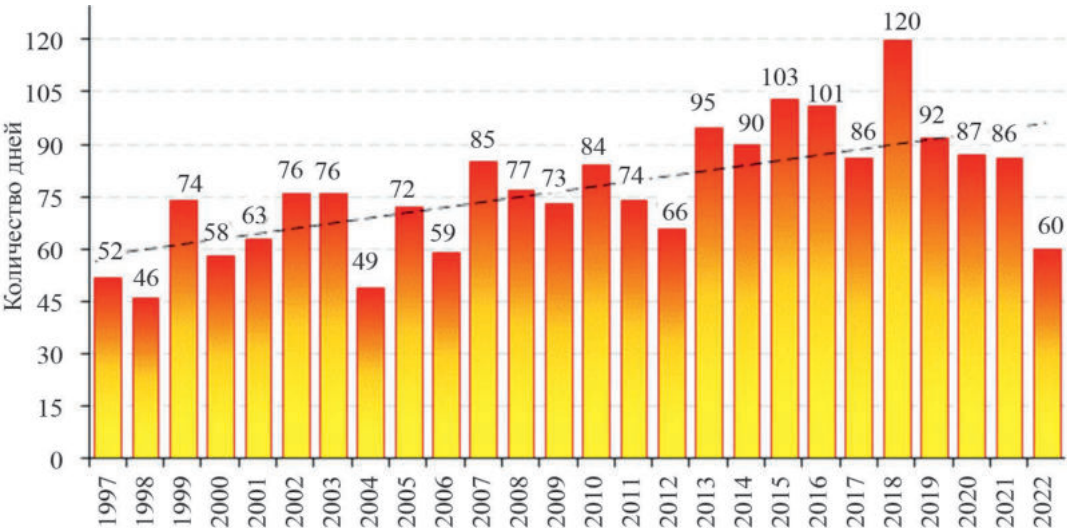


Рис. 5. Число жарких дней (с максимальной температурой воздуха +25 °C и выше)

Fig. 5. Number of hot days (with a maximum air temperature of +25 °C and above)

Следует отметить, что увеличение числа жарких дней с температурой воздуха +25 °C и выше (май – сентябрь) в течение периода потепления также характерно для всей территории Беларуси и, следовательно, вызвано общими тенденциями изменения климата.

Режим увлажнения. Атмосферные осадки являются одним из основных параметров климата и главной составляющей общего влагооборота атмосферы. Исходя из средних многолетних значений, полученных за весь период инструментальных наблюдений (1997–2022 гг.), на рассматриваемой территории в среднем за год выпадает 593,7 мм атмосферных осадков, а число дней с осадками в среднем составляет 128 (35,1 %) (табл. 3). Наименьшее количество осадков пришлось на 2019 г. (377,1 мм), когда их сумма составила всего 63,5 % годовой «нормы». За данный период количество атмосферных осадков, когда они выпадали преимущественно в твердом виде, пришлось 8,7 %, а остальные 91,3 % (теплый период (апрель – октябрь)) выпадали преимущественно в виде дождя. Такое распределение является характерным для территории исследуемого региона.

Таблица 3

Режим увлажнения (1997–2022 гг.)

Table 3

Humidification mode (1997–2022)

Год	Количество дней с осадками	Сумма осадков, мм	Испаряемость, мм	Коэффициент увлажнения
1997	145	483,8	534,1	0,9
1998	161	711,2	559,4	1,3
1999	122	572,3	593,0	1,0
2000	136	459,3	581,5	0,8
2001	114	563,4	516,7	1,1
2002	119	516,8	632,5	0,8
2003	88	568,3	687,9	0,8
2004	128	710,7	523,0	1,4
2005	98	657,6	554,6	1,2
2006	144	623,5	463,6	1,3
2007	140	641,1	706,6	0,9
2008	124	562,0	618,8	0,9
2009	137	564,7	551,9	1,0
2010	129	618,8	536,4	1,2
2011	112	632,5	563,0	1,1
2012	124	719,2	502,6	1,4
2013	131	781,9	547,8	1,4
2014	98	450,0	686,3	0,7
2015	104	453,9	848,0	0,5
2016	134	722,3	664,4	1,1
2017	141	652,1	629,7	1,0
2018	136	556,7	800,5	0,7
2019	131	377,1	687,0	0,6
2020	117	618,7	682,1	0,9
2021	120	517,3	690,1	0,8
2022	185	697,6	683,2	1,0
Среднее за 26 лет	128	593,7	618,5	1,0

Исследуемая территория относится к зоне неустойчивого увлажнения, и распределение осадков во времени всегда отличается большой изменчивостью. В связи с неравномерностью выпадения осадков наблюдаются засушливые периоды. Коэффициент увлажнения, по Иванову, (отношение количества

выпадающих осадков к испаряемости) в различные годы может составлять от 0,5 недостаточное увлажнение (2015 г.) до 1,4 (2004, 2012, 2013 гг.), когда наблюдался избыток влаги. Преобладание в 2004, 2012, 2013 гг. количества атмосферных осадков над испаряемостью, характеризовало их как годы с избыточным увлажнением. Наиболее недостаточное увлажнение с коэффициентом всего 0,5, зафиксированное в 2015 г., сопровождалось наибольшей испаряемостью (848,0 мм). В обычные годы характерной особенностью территории является превышение суммы осадков за год над количеством испарившихся с поверхности влаги, что создает промывной тип водного режима и приводит к заболачиванию пониженных участков, образованию полугидроморфных и гидроморфных почв.

Анализ полученных результатов показал, что, несмотря на значительные колебания количества осадков по годам, наблюдается положительная тенденция их увеличения (15,6 мм/год), при этом наиболее заметное увеличение отмечалось в холодный период (12,3 мм/год). Наблюдается тенденция роста числа дней с осадками – в среднем с учетом прямолинейной зависимости 3,7 дней/год (рис. 6).



Рис. 6. Динамика количества осадков, мм

Fig. 6. Precipitation dynamics, mm

Изменение количества осадков может быть вызвано изменением циркуляционных процессов в атмосфере, а также влиянием подстилающей поверхности исследуемого региона. От количества выпавших осадков и температурных условий периода снегонакопления зависит высота снежного покрова. Исследования показывают, что мощность снежного покрова меняется от года к году и значительно отклоняется от средних величин. Средняя высота снежного покрова, исследовалась нами в 2001–2022 гг. составила 6 см (рис. 7).

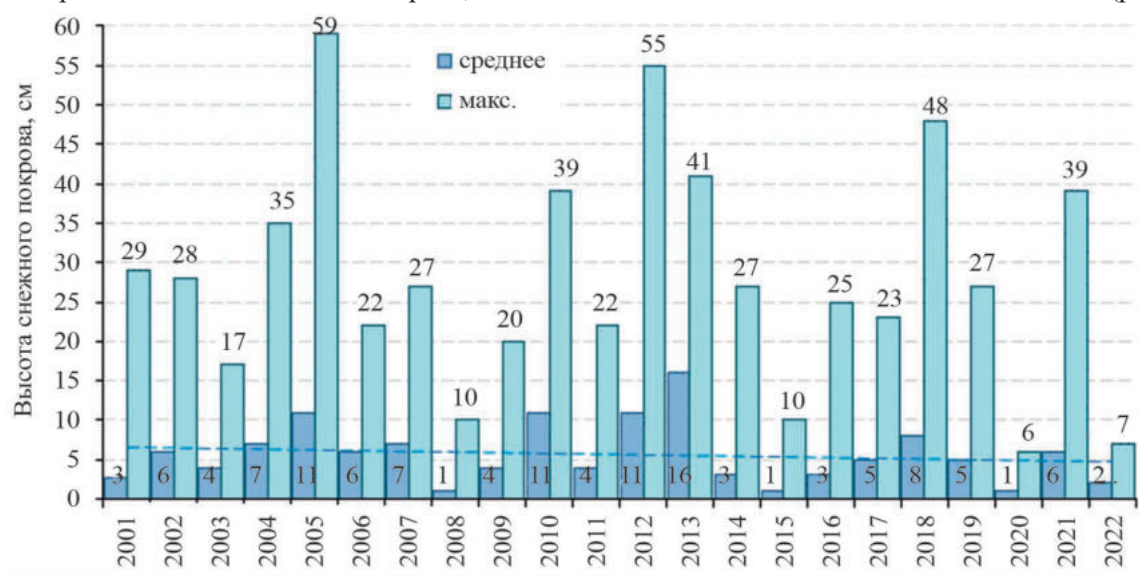


Рис. 7. Динамика высоты снежного покрова, см

Fig. 7. Snow depth dynamics, cm

При средней плотности снежного покрова $0,23 \text{ г/см}^3$ запас воды в нем на элементах природного ландшафта, по данным снегосъемок, в среднем составлял 27,6 мм. Минимальный запас воды 2,1 мм наблюдался в 2008, 2015 и 2020 гг., когда средняя высота снежного покрова достигала всего 1 см, максимальный – 50–60 мм в 2005, 2012 и 2013 гг. За 2001–2022 гг. снежный покров в среднем залегал 69 дней (рис. 8).

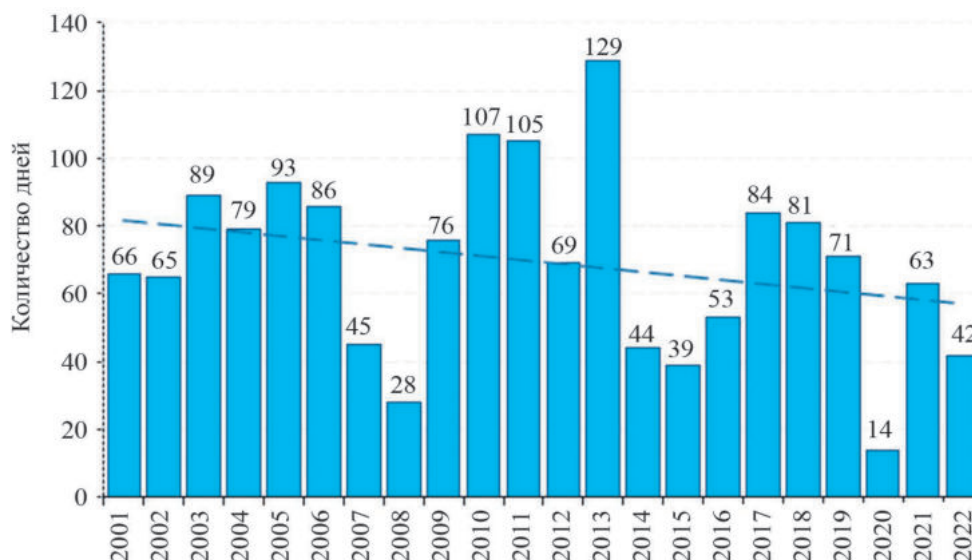


Рис. 8. Динамика количества дней со снежным покровом, дней/год

Fig. 8. Dynamics of the number of days with snow cover, days/year

Несмотря на значительные межгодовые различия по количеству дней со снежным покровом, их число имеет явную тенденцию к снижению с годами.

Малое количество осадков способствовало пониженной влажности воздуха в регионе. Относительная влажность воздуха является важным экологическим показателем среды, так как характеризует степень насыщения воздуха водяным паром, в тоже время она зависит от многих факторов, в том числе от физико-географических условий местности, времени года, суток и ряда других. Относительная влажность воздуха представляет собой отношение фактического содержания водяного пара к максимально возможному его содержанию при данной температуре. За период 1997–2022 гг. в среднем она составила 78 % (рис. 9).

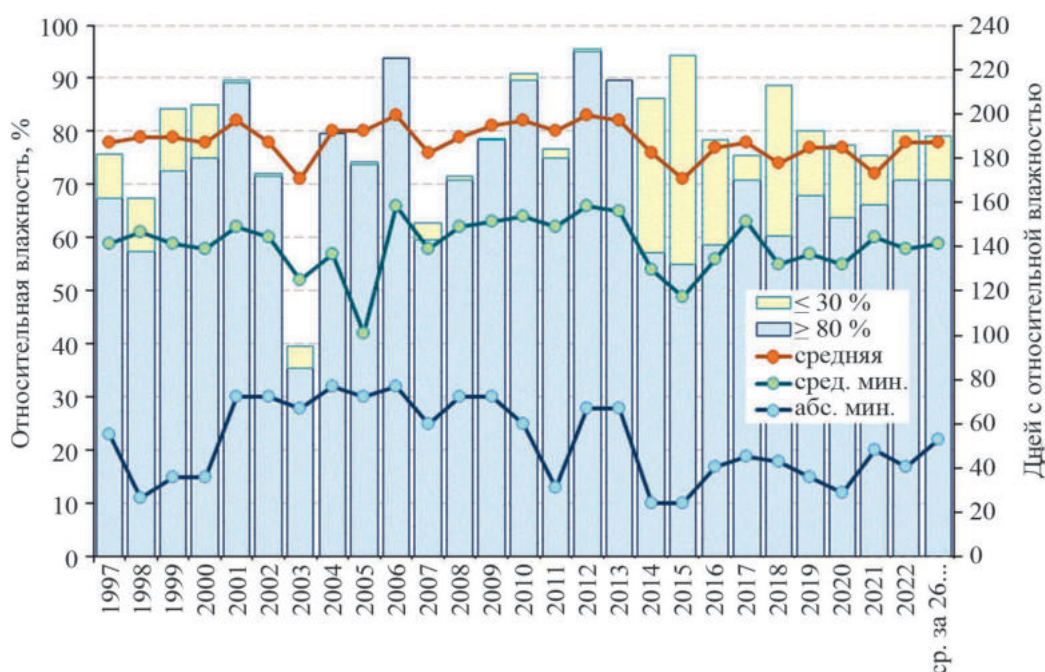


Рис. 9. Динамика относительной влажности воздуха, %

Fig. 9. Dynamics of relative air humidity, %

За данный период среднее количество влажных дней, когда и в послеполуденные часы (следовательно, в течение всех суток) влажность не падала ниже 80 %, составило 170. Среднее количество сухих дней, когда в дневные часы относительная влажность понижалась до 30 % и менее, составило 20 %. Преобладающим по числу сухих дней оказался 2015 г. – 94 дня. Преобладающим по числу влажных дней оказался 2012 г. – 228 дней.

Сумма активных температур как показатель совокупной потребности растений в тепле была введена в агрометеорологии Реомюром в 1734 г. Позднее Г. Т. Селянинов применил этот показатель для оценки обеспеченности теплом периода активной вегетации сельскохозяйственных культур. Средняя сумма активных температур за 1997–2022 гг. в ближней зоне аварии на ЧАЭС составляет 2842 °С, в межгодовом ходе ее повышение отмечается во все годы исследований (рис. 10). Самая высокая сумма активных температур зафиксирована в 2018 г. (3219 °С), самая низкая – в 1997 г. (2382 °С).

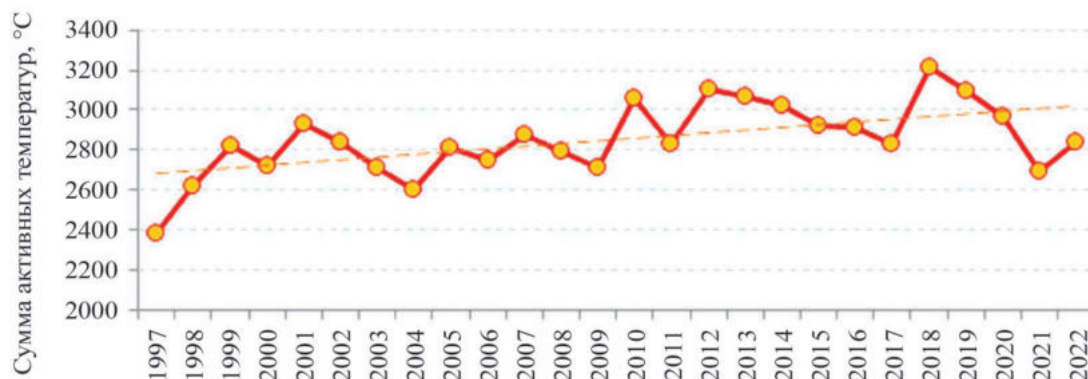


Рис. 10. Динамика сумм активных температур в ближней зоне аварии на ЧАЭС, °С

Fig. 10. Dynamics of sums of active temperatures in the exclusion zone of the CNPP, °С

Давление воздуха и ветер. Данный показатель необходим для удовлетворения потребностей в интересах различных метеорологических применений, в первую очередь для определения полей давления, составляющих основу всех последующих прогнозов состояния атмосферы. Величины атмосферного давления достаточно устойчивы и составили на уровне исследовательской станции «Масаны» в среднем около 1002 гПа. Стоит подчеркнуть, что давление воздуха меняется в течение года и зависит от ряда погодноклиматических условий, поэтому для каждой местности «норма» атмосферного давления определяется статистически. Изменение давления происходит в результате движения воздушных масс. При сравнении максимумов и минимумов давления можно заметить, что в холодный период максимумы значительно выше, а минимумы ниже, чем в теплый, что связано с большей интенсивностью циркуляции в холодную половину года.

Ветровой режим. Ветровой режим и его оценка с помощью графического сравнительного анализа показала, что преобладающими являлись ветра северо-западного (СЗ) направления, характеризующие данный регион (рис. 11).

В 1997–2022 гг., в частности в 2022 г., наблюдалось уменьшение ветров юго-восточного и западного направлений по отношению к многолетнему режиму. Вместе с тем зафиксировано увеличение ветров южного направления. Стоит подчеркнуть, что преобладающие направления ветров за весь период инструментальных наблюдений, наряду с северо-западными, составляют ветра западного (З) и юго-восточного (ЮВ) направления. Это подтверждает то, что годовой ход климатических характеристик ветра по территории чрезвычайно изменчив. Наличие сильных колебаний режима ветров, обусловленных сильной турбулентностью, отмечается при наблюдениях таких явлений, как порывистость или шквалистость. Ветер скоростью порядка 5–8 м/с считается умеренным, выше 14 м/с – сильным, выше 20–25 м/с – штормом, а выше 30 м/с – разрушительным ураганом [13]. Резкие кратковременные усиления ветра до значений порядка 20 м/с и выше носят название шквалов [10]. Если мгновенная скорость (порыв ветра) достигает 25 м/с, то это относят к опасным гидрометеорологическим явлениям [11]. В нашем случае максимальные порывы ветра наблюдались в диапазоне 15,6–17,0 м/с, а в 2015 г. (апрель) был зарегистрирован наибольший максимальный порыв ветра 17,5 м/с [14]. Минимальная среднегодовая скорость ветра за данный период составила 1,4 м/с. На долю штилевых условий пришлось 20 %.

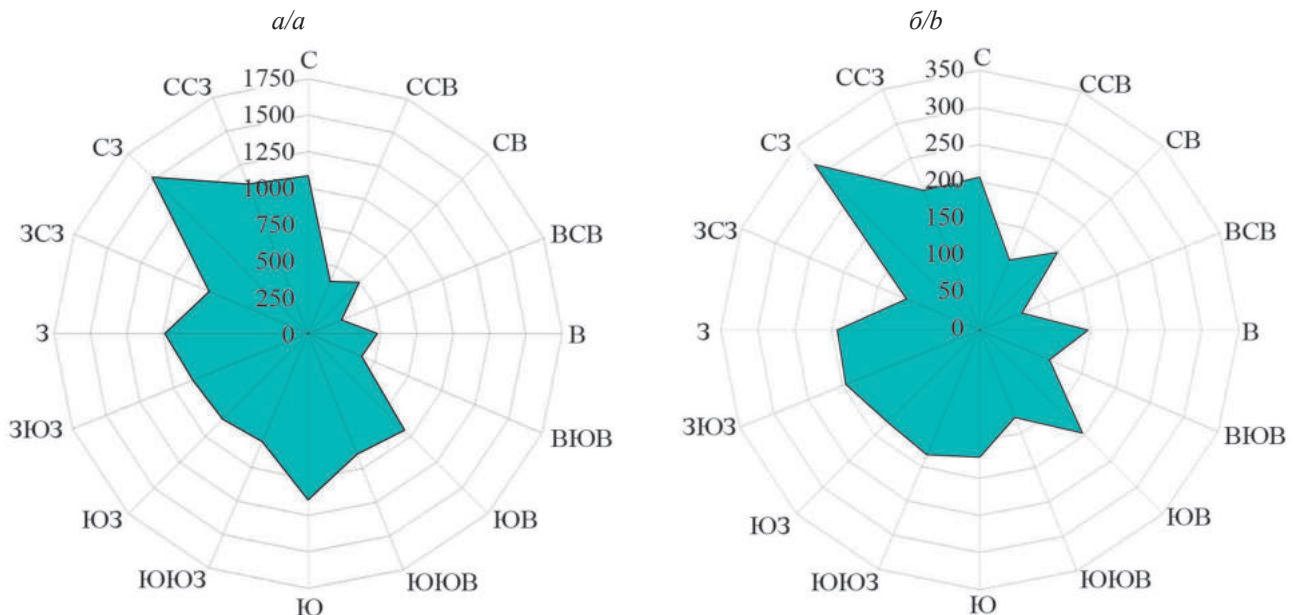


Рис. 11. Роза ветров: а) 1997–2022 гг.; б) 2022 г.

Fig. 11. Wind rose: a) 1997–2022; b) 2022

Заключение

Анализ динамики полученных на исследовательской станции «Масаны» метеорологических показателей за период 1997–2022 гг. позволил определить климатические характеристики территории белорусского сектора ближней зоны Чернобыльской АЭС, оценить их временную изменчивость. Установлено, что температурный режим оказался теплее обычного, среднегодовая температура воздуха увеличилась по отношению к среднему многолетнему значению. Выявлена тенденция ее повышения, которая в настоящее время для данной территории составляет около $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Наибольшие отклонения в сторону увеличения температур от средних многолетних значений отмечалось в 2020 г., когда среднегодовая температура оказалась выше «нормы» на $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Абсолютный максимум ($+39,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) для наших наблюдений был зарегистрирован в 2015 г., абсолютный минимум – в 2012 г. ($-34,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Среднегодовое значение интенсивности суммарной солнечной радиации в реальных условиях облачности составило $0,21\text{ кВт}/\text{м}^2$. Обнаружено некоторое увеличение количества выпадения атмосферных осадков, сумма которых составила 106 % от среднего многолетнего значения. Анализ современных тенденций изменения количества атмосферных осадков обнаружил их увеличение около $0,4\text{ мм}/\text{год}$, при этом наиболее отрицательный тренд отмечался в теплый период. Увеличилась сумма активных температур ($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) и составляет в настоящее время более $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$, что относит данный регион к «новой агроклиматической зоне» [15; 16]. Снизилось на 23 % количество дней со снежным покровом, при этом средняя его высота составила всего 6 см. Запас воды в снежном покрове на элементах природного ландшафта также значительно снизился. Малое количество осадков способствует пониженной влажности воздуха в регионе. На рассматриваемой территории в среднем за год выпадает $593,7\text{ мм}$ атмосферных осадков, что характеризует ее как регион с недостаточным увлажнением. В связи с преобладанием испаряемости над количеством атмосферных осадков, коэффициент увлажнения (баланс влаги) в данный период часто оказывался ниже единицы. Ветровой режим и его оценка с помощью графического сравнительного анализа показала, что преобладающими ветрами являлись ветра северо-западного, юго-западного и южного направления. Максимальные порывы ветра наблюдались в диапазоне $15,6\text{--}17,0\text{ м}/\text{с}$, а в 2015 г. (апрель) был зарегистрирован наибольший максимальный порыв ветра $17,5\text{ м}/\text{с}$. Минимальная среднегодовая скорость ветра за данный период составила $1,4\text{ м}/\text{с}$. Штилевые условия преобладали в 20 % случаев.

Изменение климатических характеристик, происходящее на всей территории Беларуси в последние десятилетия, отмечается и в исследуемом регионе. Оно выражается в увеличении температуры воздуха с наибольшими отклонениями в зимне-весенний и летний периоды, что повлекло существенное изменение агроклиматических показателей: возросло число жарких (с максимальной температурой воздуха $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше), а также сухих дней. Наблюдается рост сумм температур воздуха за вегетационный период выше $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и продолжительность времени с пороговыми значениями данных температур. Отмечено снижение количества дней со снежным покровом.

Библиографические ссылки

1. Израэль ЮА. *Экология и контроль состояния природной среды*. Москва: Гидрометеиздат; 1984. 560 с.
2. Лысухо НА, Санковский АГ, Моложанова СВ, и др. Проблема глобального изменения климата и её решение в Республики Беларусь. *Техническое содействие Украине и Беларуси в выполнении обязательств по предупреждению глобального изменения климата. Проект Европейского Союза*. Минск; 2006. 16 с.
3. Логинов ВФ, Микуцкий ВС. Оценка вклада урбанизации в изменение климата. В: *Научно-методическое обеспечение деятельности по охране окружающей среды: проблемы и перспективы*. Минск: Бел НИЦ «Экология»; 2011. с. 57–67.
4. Мельник ВИ, Комаровская ЕВ. Особенности изменения климата на территории Республики Беларусь за последние десятилетие. В: *Научно-методическое обеспечение деятельности по охране окружающей среды: проблемы и перспективы*. Минск: Бел НИЦ «Экология»; 2011. с. 77–84.
5. Логинов ВФ, редактор. *Климат Беларуси*. Минск: Институт геологических наук АН Беларуси; 1996. 234 с.
6. Наркевич ИП, Вавилонская ОН. Основные аспекты изменения климата в Беларуси. В: *Научно-методическое обеспечение деятельности по охране окружающей среды: проблемы и перспективы*. Минск: Бел НИЦ «Экология»; 2011. с. 46–57.
7. Марченко ЮД. Особенности погодно-климатических условий территории белорусского сектора ближней зоны Чернобыльской АЭС. В: *Природные ресурсы Национального парка «Припятский» и других особо охраняемых природных территорий Беларуси: изучение, сохранение, устойчивое использование*. Минск: «Белорусский дом печати»; 2009. с. 69–72.
8. Марченко ЮД. Состояние и изменение режима погоды в ближней зоне Чернобыльской АЭС. В: *Научно-методическое обеспечение деятельности по охране окружающей среды: проблемы и перспективы*. Минск: Бел НИЦ «Экология»; 2011. с. 85–90.
9. Марченко ЮД. Погодно-климатические условия в ближней зоне Чернобыльской АЭС. В: *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. Минск: БОРБИЦ РНИУП «Институт радиологии»; 2013. с. 32–45.
10. Чирков ЮИ. *Агрометеорология*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1986. 296 с.
11. Обризан СМ, Годун БА, Киреев СИ. Влияние опасных природных явлений и процессов в зоне отчуждения на радиоактивное загрязнение окружающей среды. В: *Радиоэкология Чернобыльской зоны*. Славутич: [б. и]; 2006. с. 54–56.
12. Марченко ЮД, Белаш ВЕ. Влияние метеоусловий на возникновение и распространение лесных пожаров в белорусском секторе зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. В: *Чернобыль: 30 лет спустя*. Гомель: Институт радиологии; 2016. с. 430–433.
13. Хромов СП, Мамонтова ЛИ. *Метеорологический словарь*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1963. 620 с.
14. Марченко ЮД, Ненашев РА, Белаш ВЕ, и др. Воздействие условий погоды на возникновение лесных пожаров в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. В: *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017*. Севастополь: СевГУ; 2017. с. 849–852.
15. Мельник В, Яцухно В, Денисов Н, и др. *Агроклиматическое зонирование территории Беларуси с учётом изменения климата в рамках разработки национальной стратегии адаптации сельского хозяйства к изменению климата в Республике Беларусь. Проект ClimaEAST*. Минск – Женева: [б. и.]; 2017. 84 с.
16. Ковалёва ОВ, Соколов АС, Карпенко АФ. Динамика Новой климатической зоны на территории Беларуси. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Естественные науки*. 2023;3(138):28–32.

References

1. Izrael' YuA. *Jekologija i kontrol' sostojanija prirodnoj sredy* [Ecology and monitoring of the state of the natural environment]. Moscow: Gidrometeoizdat; 1984. 560 p. Russian.
2. Lysuho NA, Sankovsky AG, Molozhanova SV, et al. *Problema global'nogo izmenenija klimata i ejo reshenie v Respubliki Belarus'* [The problem of global climate change and its solution in the Republic of Belarus]. Technical assistance to Ukraine and Belarus in fulfilling obligations to prevent global climate change. European Union project. Minsk; 2006. 16 p. Russian.
3. Loginov VF, Mikutsky VS. *Ocenka vklada urbanizacii v izmenenie klimata* [Assessing the contribution of urbanization to climate change]. In: Scientific and methodological support for environmental protection activities: problems and prospects. Minsk: Bel NIC «Ekologiya»; 2011. p. 57–67. Russian.
4. Melnik VI, Komarovskaya EV. *Osobennosti izmenenija klimata na territorii Respubliki Belarus' za poslednie desjatiletie* [Features of climate change on the territory of the Republic of Belarus over the past decade]. In: Scientific and methodological support for environmental protection activities: problems and prospects. Minsk: Bel NIC «Ekologiya»; 2011. p. 77–84. Russian.
5. Loginov VF, editor. *Klimat Belarusi* [Climate of Belarus]. Minsk: Institut geologicheskikh nauk AN Belarusi; 1996. 234 p. Russian.
6. Narkevich IP, Vavilonskaya ON. *Osnovnye aspekty izmenenija klimata v Belarusi* [Main aspects of climate change in Belarus]. In: Scientific and methodological support for environmental protection activities: problems and prospects. Minsk: Bel NIC «Ekologiya»; 2011. p. 46–57. Russian.
7. Marchenko YuD. *Osobennosti pogodno-klimaticheskikh uslovij territorii belorusskogo sektora blizhnej zony Chernobyl'skoj AJeS* [Features of weather and climatic conditions of the territory of the Belarusian sector of exclusion zone Chernobyl NPP]. In: Natural resources of the Pripjatsky National Park and other specially protected natural areas of Belarus: study, conservation, sustainable use. Minsk: «Belorusskij dom pečati»; 2009. p. 69–72. Russian.
8. Marchenko YuD. *Sostojanie i izmenenie rezhima pogody v blizhnej zone Chernobyl'skoj AJeS* [State and changes in weather conditions in the near zone of the Chernobyl nuclear power plant]. In: Scientific and methodological support for environmental protection activities: problems and prospects. Minsk: Bel NIC «Ekologiya»; 2011. p. 85–90. Russian.
9. Marchenko YuD. *Pogodno-klimaticheskie uslovija v blizhnej zone Chernobyl'skoj AJeS* [Weather and climatic conditions in the near zone of the Chernobyl nuclear power plant]. In: Ecosystems and radiation: aspects of existence and development. Minsk: BORBIC RNIUP «Institute of Radiology»; 2013. p. 32–45. Russian.
10. Chirkov JuI. *Agrometeorologija* [Agrometeorology]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1986. 296 p. Russian.

11. Obrizan SM, Godun BA, Kireev SI. *Vliyanie opasnykh prirodnnykh javlenij i processov v zone otchuzhdenija na radioaktivnoe zagrjaznenie okruzhajushhej sredy* [The influence of hazardous natural phenomena and processes in the exclusion zone on radioactive pollution of the environment]. In: *Radioekologiya Chernobyl'skoj zony*. Slavutich: [publisher unknown]; 2006. p. 54–56. Russian.
12. Marchenko YuD, Belash VE. The influence of weather conditions on the occurrence and spread of forest fires in the Belarusian sector of the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant. In: *Chernobyl: 30 let spustia* [Chernobyl: 30 years later]. Gomel: Institute of Radiology; 2016. p. 430–433. Russian.
13. Khromov SP, Mamontova LI. *Meteorologicheskij slovar'* [Meteorological Dictionary]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1963. 620 p. Russian.
14. Marchenko YuD, Nenashev RA, Belash VE, et al. *Vozdejstvie uslovij pogody na vzniknovenie lesnykh pozharov v zone otchuzhdenija Chernobyl'skoj AJeS* [The impact of weather conditions on the occurrence of forest fires in the exclusion zone of the Chernobyl NPP]. In: *Environmental, industrial and energy safety – 2017*. Sevastopol: SevGU; 2017. p. 849–852. Russian.
15. Melnik V, Yatsuhno V, Denisov N, et al. *Proekt ClimaEAST «Agroklimaticheskoe zonirowanie territorii Belarusi s uchjotom izmenenija klimata v ramkah razrabotki nacional'noj strategii adaptacii sel'skogo hozjajstva k izmeneniju klimata v Respublike Belarus»* [ClimaEAST project «Agroclimatic zoning of the territory of Belarus taking into account climate change as part of the development of a national strategy for adapting agriculture to climate change in the Republic of Belarus»]. Minsk – Geneva: [publisher unknown]; 2017. 84 p. Russian.
16. Kovaleva OV, Sokolov AS, Karpenko AF. *Dinamika Novoj klimaticheskoy zony na territorii Belarusi* [Dynamics of the New Climatic Zone on the Territory of Belarus]. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny. Estestvennye nauki*. 2023;3(138):28–32. Russian.

Статья поступила в редколлегию 07.07.2024.
Received by editorial board 07.07.2024.

УДК 574.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ИНВАЗИВНОГО ВИДА РЕЧНЫХ РАКОВ *PROCAMBARUS VIRGINALIS* (DECAPODA, ASTACIDEA) В РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

А. П. ГОЛУБЕВ¹⁾, Е. А. УЛАЩИК¹⁾, О. А. БОДИЛОВСКАЯ¹⁾

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

У мраморного рака *Procambarus virginalis* определена зависимость длительности межлиночных интервалов от массы тела и величины приростов массы тела за отдельные межлиночные интервалы в диапазонах температуры 15,3–17,9 °C; 7,5–18,9; 19,1–20,8; 21,0–22,8; 22,9–25,2 и 25,3–28,9 °C. По этим данным рассчитаны кривые роста их в указанных диапазонах температур и суммы эффективных температур (S_{ef}) у особей за периоды ювенильного роста и размножения. Среднее значение S_{ef} за ювенильный период *P. virginalis* (до достижения новорожденными особями массы тела 1,4 г) в исследованных температурных интервалах составляет 4316 градусо-дней при температуре биологического нуля, равном 7,6 °C. Для периода размножения (до достижения массы тела от 1,4 г до предельной массы 15 г) 10630 градусо-дней и 3,0 °C соответственно. По годовой динамике среднемесячных температур в шести континентальных водоемах в пределах инвазивного ареала *P. virginalis* (Швеция, Беларусь, Германия, Словакия, Северная Македония и Малави) рассчитаны значения S_{ef} для периодов года, в течение которых возможен рост ювенильных и размножение половозрелых особей. В водоемах умеренных широт, расположенных в Швеции, Беларуси, Германии и Словакии, значения S_{ef} в период роста ювенильных особей изменяются в пределах 1083–2099 градусо-дней. В более южном водоеме Северной Македонии этот показатель достигает 2990, а в тропическом африканском водоеме в Малави – 7076 градусо-дней. Следовательно, новорожденные особи *P. virginalis*, которые в водоемах умеренной зоны Европы отрождаются в первой половине лета, способны достичь половой зрелости лишь в третье лето жизни, а в тропическом водоеме – уже в первое лето жизни. Значения S_{ef} для периодов года, благоприятных для роста половозрелых особей, в исследованных водоемах Европы возрастают от 2031 (водоем в Швеции) до 4657 градусо-дней (водоем в Северной Македонии). В тропическом водоеме Малави этот показатель достигает 8058 градусо-дней, то есть максимальная продолжительность жизни *P. virginalis* в нем не превышает двух лет. Тем не менее, во всем ареале половозрелые особи *P. virginalis* способны произвести не более 2–5 кладок яиц за жизненный цикл.

Ключевые слова: биологические инвазии; температурный режим; речные раки; мраморный рак *Procambarus virginalis*; скорость роста; инвазивный потенциал.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках инициативной НИР «Скорость роста популяций инвазивных и аборигенных видов речных раков в условиях Беларуси» (2023–2024 гг., № госрегистрации 20230739) и гранта Министерства образования Республики Беларусь для студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Эколого-биологическая характеристика инвазивных видов десятиногих раков в природных климатических условиях Республики Беларусь» (2023 г., № госрегистрации 20230468).

Образец цитирования:

Голубев АП, Улащик ЕА, Бодилловская ОА. Моделирование роста инвазивного вида речных раков *Procambarus virginalis* (Decapoda, Astacidea) в различных температурных условиях. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2024;4:18–34 (на англ.).
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-18-34>

For citation:

Golubev AP, Ulashchyk EA, Bodilovskaya OA. Modeling the growth of the invasive river crayfish species *Procambarus virginalis* (Decapoda, Astacidea) under different temperature conditions. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2024;4:18–34.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-18-34>

Авторы:

Александр Петрович Голубев – доктор биологических наук, доцент; профессор кафедры экологического мониторинга и менеджмента.

Екатерина Александровна Улащик – аспирант кафедры экологического мониторинга и менеджмента.

Ольга Александровна Бодилловская – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры общей биологии и генетики.

Authors:

Alexander P. Golubev, doctor of science (biology), docent; professor at the department of environmental monitoring and management.

algiv@rambler.ru

Ekaterina A. Ulashchyk, postgraduate student at the department of environmental monitoring and management.

ulasikekaterina@gmail.com

Olga A. Bodilovskaya, PhD (biology), docent; associate professor at the department of general biology and genetics.

_olga_iseu@tut.by

MODELING THE GROWTH OF THE INVASIVE RIVER CRAYFISH SPECIES *PROCAMBARUS VIRGINALIS* (DECAPODA, ASTACIDEA) UNDER DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS

A. P. GOLUBEV^a, E. A. ULASHCHYK^a, O. A. BODILOVSKAYA^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: A. P. Golubev (algiv@rambler.ru)

In the marbled crayfish *Procambarus virginalis*, the dependence of the duration of inter-larval intervals on body weight and the magnitude of body weight gains for individual inter-larval intervals in the temperature ranges 15.3–17.9 °C, 7.5–18.9, 19.1–20.8, 21.0–22.8, 22.9–25.2 and 25.3–28.9 °C was determined. The growth curves of individuals in these temperature ranges and the sum of effective temperatures (S_{ef}) of individuals during juvenile growth and breeding periods were calculated from these data. The average S_{ef} value for the juvenile period of *P. virginalis* (until newborn individuals reach a body weight of 1.4 g) in the studied temperature ranges is 4316 degree·days at the biological zero temperature of 7.6 °C. For the breeding period (until reaching the body weight from 1.4 g to the limit weight of 15 g) – respectively 10630 degree·days and 3.0 °C. Based on the annual dynamics of mean monthly temperatures in six continental water bodies within the invasive range of *P. virginalis* (Sweden, Belarus, Germany, Slovakia, North Macedonia and Malawi), S_{ef} values were calculated for the periods of the year during which juvenile growth and reproduction of sexually mature individuals are possible. In temperate water bodies located in Sweden, Belarus, Germany and Slovakia, S_{ef} values during the juvenile growth period vary between 1083 and 2099 degree·days. In the more southern body of water in Northern Macedonia, this value reaches 2990 degree·days, and in the tropical African body of water in Malawi it reaches 7076 degree·days. Consequently, newborn individuals of *P. virginalis*, which in water bodies of the temperate zone of Europe hatch in the first half of summer, can reach sexual maturity only in the third summer of life, and in a tropical water body – already in the first summer of life. S_{ef} values for periods of the year favorable for the growth of sexually mature individuals in the studied water bodies of Europe increase from 2031 degree·days (water body in Sweden) to 4657 degree·days (water body in Northern Macedonia). In the tropical water body of Malawi, this figure reaches 8058 degree·days, i.e. the maximum life span of *P. virginalis* in this water body does not exceed two years. Nevertheless, throughout the entire range, sexually mature individuals of *P. virginalis* are capable of producing no more than 2–5 clutches of eggs per life cycle.

Keywords: biological invasions; river crayfish; marbled crayfish *Procambarus virginalis*; growth rate; invasive potential.

Acknowledgements. The studies were conducted within the framework of the initiative research project «Growth rate of populations of invasive and native species of river crayfish in the conditions of Belarus» (2023–2024, state registration number 20230739) and the grant of the Ministry of Education of the Republic of Belarus for students, graduates and young scientists «Ecological and biological characteristics of invasive species of ten-legged crayfish in natural climatic conditions of the Republic of Belarus» (2023, state registration number 20230468).

Introduction

Invasion of animal and plant species into new geographic regions as a result of the influence of numerous natural (geological, climatic and biological) factors with the displacement of native species has always existed. With the advent of man and the anthropogenic factors he created, the process of invasion began to accelerate more and more and in the second half of the twentieth century it became a serious environmental problem in almost all regions of the planet.

One of the striking examples among aquatic organisms is the massive penetration of alien species of crayfish (order Decapoda, infraorder Astacidea) of North American and Australian origin into water bodies of Europe, Asia and Africa, caused almost exclusively by anthropogenic factors. It leads not only to a decrease in the number and even complete displacement of native crayfish species and the destruction of established biotic complexes of inland water bodies, but also causes significant material damage. For the period 2000–2020 economic losses from invasion of various crayfish species worldwide exceed 120 million dollars [1].

By the beginning of the 21st century, in many European countries, the number of invasive crayfish species reached and even exceeded the number of their native relatives [2]. In the current situation, a number of methods and measures have been proposed for the conservation of native species of crayfish, but their effectiveness raises reasonable doubts [3; 4]. In the foreseeable future, it is possible to expect that invasive crayfish in European water bodies will become dominant not only in the number of species, but also in the number and biomass of populations. In this case, they will inevitably enter into intense competition with each other, the outcome of which is currently impossible to predict.

However, this question is of significant scientific interest, since it will expand the understanding of the patterns of transformation processes of the fauna of continental water bodies in the modern era under the influence of global natural (climate changes, biological invasions) and anthropogenic (pollution of water bodies, changes in their abiotic and biotic characteristics, etc.) factors.

One of the most aggressive species of invasive decapod crayfish, rapidly spreading throughout the planet, is the marbled crayfish, *Procambarus virginalis* (family Cambaridae), popular among aquarists around the world [5]. Its distinctive feature is obligate parthenogenetic reproduction, which is a unique case in the infraorder Astacidea.

Special molecular genetic studies have established that all aquarium parthenogenetic individuals of marbled crayfish are triploid females, which originated from a single individual of the subtropical North American species *Procambarus fallax* (Hagen, 1870) as a result of a genomic mutation [6]. Two sex X chromosomes in the chromosome set of *Procambarus virginalis* are genetically completely identical, and the third has quite significant differences from them [7]. Most likely, in one female *P. fallax*, as a result of a violation of meiosis, an egg cell with two X chromosomes was formed, which was successfully fertilized by spermatozoon with an X-chromosome.

After the experimental establishment of reproductive isolation between *P. fallax* males and females of marbled crayfish, the latter was recognized as an independent species, *Procambarus virginalis* sp. nov. Lyko, 2017 [5]. Its occurrence is a striking example of saltation, or quantum speciation [8].

The natural range of *P. fallax* covers only the basin of the small Satilla River in the states of Georgia and Florida (USA). This species, like other Astacidea, is bisexual. However, recent molecular genetic studies have revealed the presence of parthenogenetic females of *P. virginalis* in its natural populations. Therefore, along with the offspring from the bisexual reproduction of *P. fallax*, they also contain clones originating from parthenogenetic individuals of *P. virginalis* [9].

In North America, *P. fallax* is one of the most important objects of the aquarium animal trade [10; 11]. Obviously, some batches of *P. fallax*, caught from natural reservoirs for sale in the USA and then in Europe, also contained parthenogenetic individuals, which quickly spread among aquarists.

Since the beginning of the 21st century *P. virginalis* from aquaria, as a result of accidental or deliberate introduction, has widely spread throughout the water bodies of many countries of the world with significantly different temperature conditions. In Europe, it is distributed from Belgium to Romania and from Sweden to Ukraine and Croatia [12–15]. Beyond its borders, the marbled crayfish has widely settled in numerous reservoirs of the lowland part of the island of Madagascar [16]. It was also found in one of the lakes on the Japanese island of Hokkaido [17], reservoirs in Taiwan [18], Israel [19], and an ornamental pond in Macau (China) [20].

One of the most important parameters determining the invasive potential of a particular species is the rate of growth of their populations in comparison with that of closely related native species [21]. In turn, it is determined by three important parameters: the survival rate of juveniles, the total fecundity of females during the life cycle, and generation time [22]. The total fecundity of female crayfish is quite easy to determine based on the results of field population studies.

It is much more difficult to determine the generation time in natural populations of crayfish. For rough estimates, it can be equated to the duration of the juvenile period in females, i. e. the age at which they laid their first clutch. However, most species of crustaceans have a long-life cycle (from 2–3 to 10 or more years), which does not always allow for appropriate laboratory experiments.

However, the growth rate of all crayfish species is determined by the frequency of their molts, which in turn is largely determined by the temperature of the environment [23]. Using the noble crayfish *Astacus astacus* as an example, we developed a model for reconstructing the somatic growth of individuals based on the duration of intermolt intervals in individuals with different body weights and body weight increments during separate intermolt intervals [24]. The results of calculations of *A. astacus* growth curves using this model showed good agreement with the corresponding empirical data. Therefore, we used this method to simulate the growth processes of marbled crayfish over their life cycle.

The modern extensive invasive area of marbled crayfish covers regions with different natural and climatic, primarily temperature, conditions. One of the most important limiting environmental factors for crayfish is the temperature regime of water bodies, which has a significant impact not only on their survival and seasonality of reproduction, but also on the duration of embryogenesis and intermolt intervals [25]. Therefore, studying the effect of temperature on the growth of marbled crayfish individuals allows us to make predictive estimates of the invasive potential of their populations in new habitat conditions.

Materials and methods

The studies were conducted in 2015–2022 on individuals from a laboratory culture of *P. virginalis* kept at the International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University. The culture obtained from a single maternal individual was, of necessity, located in a laboratory room that was poorly heated in winter and strongly heated in summer. During the year, the temperature in it varied from 13–16 °C in December–February

and to 28–32 °C in July–August. However, this same circumstance made it possible to estimate the effect of the temperature factor on the frequency of molting.

Newborns at the age of 2–3 weeks were seated individually in vessels with a volume of 1 liter. Then, as they grew, they were transferred to larger aquariums with a water volume of up to 5 liters. All containers with animals were checked at least 1–2 days to record the dates of individual molts and the laying of eggs on pleopods. All individuals were weighed after each molt. For further analysis, we used only the duration of time intervals between two successive molts, during which females did not lay eggs or bear young.

The water temperature in the vessels was determined daily. These data were used to calculate average temperatures for individual intermolt intervals. The animals in the experiment were fed live larvae of the chironomid *Chironomus sp.* and Cladocera species *Daphnia magna*, supplied in abundance. At least twice a week, a complete change of water was carried out in all containers.

The specific growth rate of individuals (r , time^{-1}) for certain periods of time ($\tau_1 - \tau_2$) was calculated according to (1):

$$r = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (1)$$

where W_2 and W_1 are the weight of individuals at ages τ_2 and τ_1 .

The Van't Hoff coefficient values (Q_{10}) for molting frequency ($V = 1/D_m$, day^{-1} , where D_m is the duration of the intermolt interval) for individual temperature ranges were calculated according to (2):

$$Q_{10} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{10}{(t_2 - t_1)}}, \quad (2)$$

where V_1 and V_2 are the frequency of molts at temperatures t_1 and t_2 .

All calculations are performed in the *STATISTICA 8* software package.

The present-day wide invasive area of marble crayfish covers various natural zones – from the tropics to the subarctic regions. The temperature regime of reservoirs in these regions varies sharply, which has a significant impact on the processes of growth and reproduction of this species. We conducted a comparative analysis of the features of changes in average monthly temperatures in six model reservoirs in different zones of the range of this species and the features of the impact of their temperature regime on the growth of marbled crayfish. The model reservoirs were:

1. A reservoir near the city of Jönköping in Southern Sweden, where the northern border of the invasive area of *P. virginalis* currently lies [26].

2. Zaslavskaye reservoir near Minsk (Belarus). As of 2024, this species has not been found in natural reservoirs of Belarus. However, in our country it is also a popular aquarium species and sold in specialized stores [27], which, unfortunately, does not exclude its penetration into the natural environment. In addition, Zaslavskaye Reservoir is located in the central part of Belarus, so its thermal regime is quite typical for reservoirs throughout the country.

3. A reservoir in Frankfurt am Main (Germany), since the marbled crayfish was first discovered in natural water bodies exactly in Germany [28].

4. A reservoir in Bratislava (Slovakia), since a stable population of this species was found near this city [29].

5. Plain Dojran Lake (North Macedonia), since currently the marbled crayfish actively populates the water bodies of the Balkan Peninsula [30].

6. Coastal zone of Monkey Bay on the extreme southwestern section of the shore of Nyasa Lake (Malawi, East Africa). We took it for rough estimation of the temperature regime in freshwater bodies of the island of Madagascar, which is the southern border of the modern invasive range of the marbled crayfish [16]. Unfortunately, we were unable to find the necessary data on the thermal regime of freshwater bodies on this island in publicly available sources of information. However, since Madagascar and Malawi are located in the geographic region of Southeast Africa there is every reason to believe that the temperature regimes of freshwater bodies of Madagascar and Lake Nyasa Lake are very similar.

Data on the temperature regime of the listed reservoirs are taken from the publicly available Internet resource <https://seatemperature.info/>. Calculations of the sums of temperatures for separate periods of the year were carried out in the computer program «Integral Calculator» <https://www.integral-calculator.ru/>.

Results and discussion

In all species of crustaceans the duration of intermolt intervals increases with increasing mass of individuals and decreases with increasing temperature [31]. In our experiments, individuals grew and molted over a wide temperature range. Therefore, to eliminate the influence of the temperature factor on the dependence of the duration of intermolt intervals (D_m) on the mass of individuals (W), all available D_m values were distributed over six temperature intervals in which the average temperatures during intermolt intervals changed by no more than 3 °C.

Despite the rather significant scatter of empirical data in all temperature intervals, the relationship between these parameters in *P. virginalis*, as well as in other species of crustaceans, is well approximated by the power equation:

$$D_m = pW^q, \quad (3)$$

where p and q are empirical coefficients, the parameters of which are presented in table 1.

In double logarithmic coordinates, equation (3) is transformed into a linear regression equation:

$$\lg D_m = \lg p + q \lg W. \quad (4)$$

In graphical form, the dependence of D_m on W in different temperature intervals is presented in Fig. 1, and the parameters of equation (1) for different temperatures are in table 1.

Due to the large range of variation in individual weights, both scales are presented in logarithmic coordinates. The straight lines are the regression lines of equation (2), whose parameters are given in Table 1; the dashed line is the 95 % significance level.

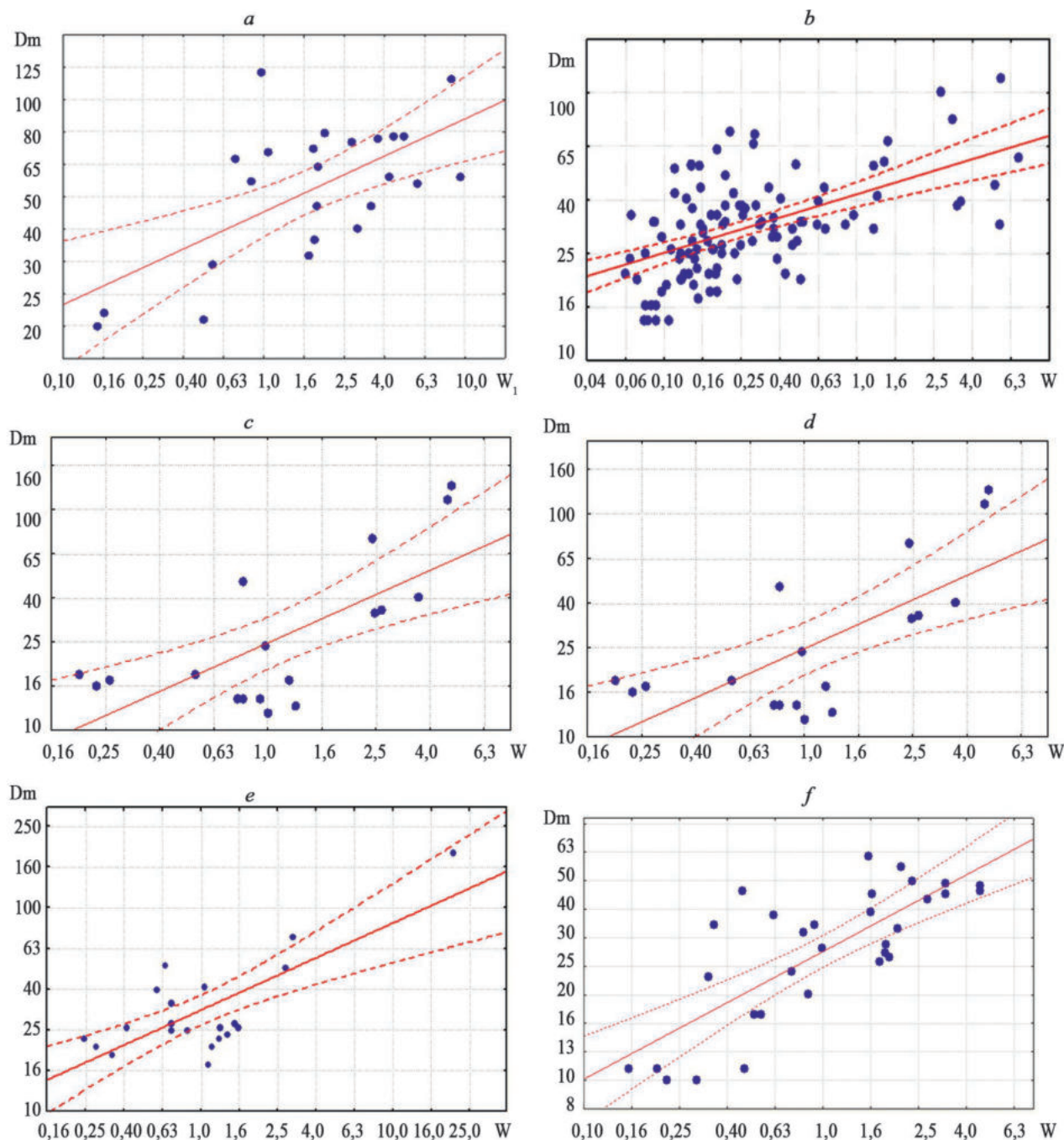


Fig. 1. Dependence between of the duration of intermolt periods (D_m , days) and body weight (W , g) before the previous molt in marbled crayfish at different temperature intervals: a) 15.3–17.1 °C; b) 17.5–18.9 °C; c) 19.1–20.8 °C; d) 21.0–22.8 °C; e) 22.9–25.2 °C; f) 25.3–28.9 °C

Table 1

Parameters of equation (3) of dependence of interlinear interval duration on body weight of marbled crayfish

Temperature range, °C	Average temperature, °C	Weight range of individuals, g	p	q	r*	Average of
15.3–17.1	16.5	0.148–9.484	45.0	0.2871	0.6382	1.351
17.5–18.9	18.2	0.064–6.950	41.8	0.2185	0.5481	1.295
19.1–20.8	19.7	0.063–6.650	34.0	0.3353	0.7642	1.362
21.0–22.8	22.0	0.200–4.786	24.9	0.5480	0.7100	1.303
22.9–25.2	23.9	0.246–20.52	31.4	0.4275	0.7479	1.333
25.3–28.9	26.2	0.154–4.538	28.3	0.4478	0.7736	1.356

*Correlation coefficient between $\lg D_m$ and $\lg W$ in the equation (4)

It is important to note that as the body weight of individuals increases, the effect of temperature on the frequency of their molts weakens (Fig. 2).

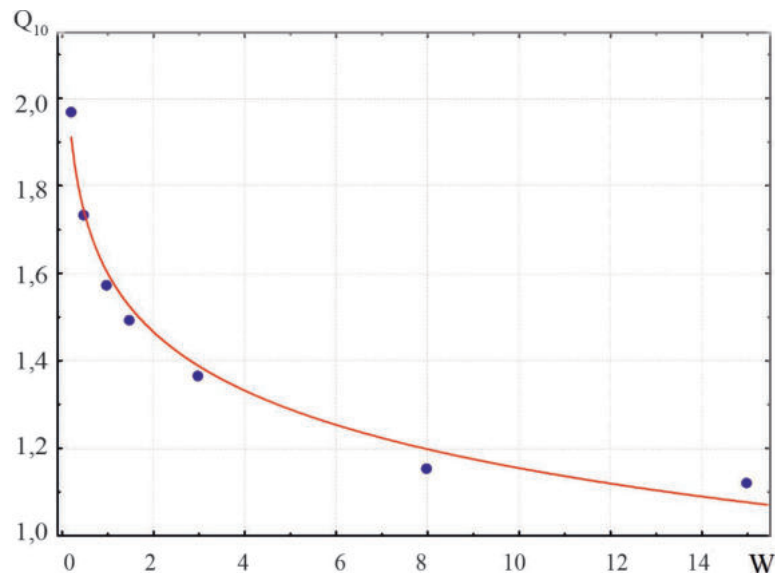


Fig. 2. Dependence between the Q_{10} coefficient for the frequency of molts ($1/D_m$, day⁻¹) and the weight of marbled crayfish individuals (W , g) in the interval 16.5–26.2 °C

The values of $1/D_m$ for the temperatures 16.5 °C and 26.2 °C were calculated using the corresponding equations (3), the parameters of which are given in Table 1.

An increase in the mass of decapod crayfish, which have massive and hard outer integuments, occurs only in the first few days after molting, until the new integuments harden. Therefore, the frequency of molting directly determines the rate of weight growth of crayfish.

The principle of calculating growth curves of individuals is as follows. In the *Excel-2003* editor, a table of 4 columns is built (Table 2). **The first column** contains the serial numbers of molts (i). **The second column** contains the weights of individuals after the corresponding molt (W_i). The values of the post-molt weight of individuals in any pair of subsequent (W_{i+1}) and previous molts (W_i) can be calculated by the equation:

$$W_{i+1} = \beta W_i, \quad (5)$$

where β is the ratio of the mass of individuals after the subsequent molt to their weight after the previous molt, expressed in fractions of unity:

$$\beta = \frac{W_{i+1}}{W_i}. \quad (6)$$

In all temperature intervals, no statistically significant dependence of β values on the weights of individuals was established. Therefore, for further calculations we will use their averaged values for each temperature interval (Table 1).

Table 2

Example calculations of age curves of marbled crayfish per life cycle at temperatures of 25.3–28.9 °C

Number of moult, i_i	W_i , г	D_i days	τ , days	i_i	W_i , г	D_i , days	τ , days
1	2	3	4	1	2	3	4
0	0.007	3	0	14	0.500	21	138
1	0.010	4	4	15	0.675	24	162
2	0.013	4	8	16	0.915	27	189
3	0.018	5	12	17	1.240	31	220
4	0.024	5	18	18	1.682	35	255
5	0.032	6	24	19	2.281	40	295
6	0.044	7	31	20	3.092	46	341
7	0.059	8	39	21	4.193	53	394
8	0.080	9	48	22	5.686	60	455
9	0.109	10	58	23	7.710	69	524
10	0.147	12	70	24	10.455	79	603
11	0.200	14	84	25	14.177	91	693
12	0.271	16	100	26	19.224	104	797
13	0.368	18	118	27			

Body weight of individuals after each successive molt (W_i) increases exponentially:

$$W_i = W_0 \beta^i, \tag{7}$$

where W_0 is the average weight of newborn *P. fallax* individuals, which, according to our data, is 0.007 g, i – is the molting serial number.

The third column contains the values of the duration of the subsequent intermolt interval (D_i) for a molted individual with mass W_i , calculated according to (4). **The fourth column** records the total values of D with an increasing total, which corresponds to the age of individuals (τ , days) after each successive molt. The age of individuals in our calculations was limited to 780–820 days, which approximately corresponds to the maximum duration of life expectancy of this species in the temperature range of 20–25 °C.

Growth curves for other temperature intervals were calculated in a similar way (Fig. 3).

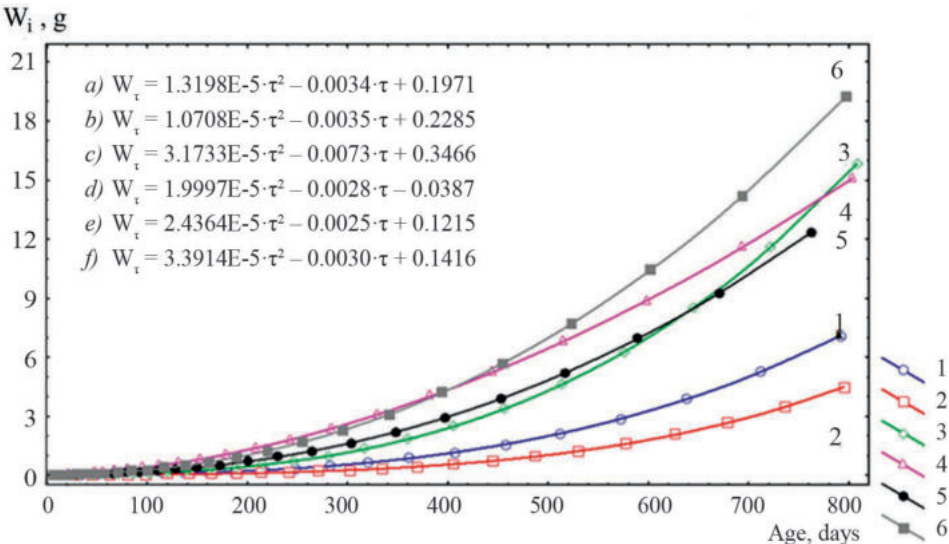


Fig. 3. Parameters of equation (4) and calculated growth curves of *Procambarus virginalis* at different temperature intervals: a) 15.3–17.1 °C; b) 17.5–18.9 °C; c) 19.1–20.8 °C; d) 21.0–22.8 °C; e) 22.9–25.2 °C; f) 25.3–28.9 °C

According to our data [32], individuals began to produce their first clutches already when they reached a body weight of 0.85 to 1.2 g. A definite dependence of this indicator on temperature has not been established. However, in the vast majority of cases, such clutches were unviable and the females quickly discarded them. Viable clutches began to be produced by larger individuals, with a body weight of 1.4 g or more.

The calculated growth curves of *P. virginalis* in all temperature intervals are satisfactorily described by the second-degree polynomial equation:

$$W_{\tau} = a\tau^2 + b\tau + C, \quad (8)$$

where W_{τ} is the mass of individuals, g, τ is the age of individuals, days, a , b and C are empirical constants.

The parameters of equations (8) for different temperature intervals are presented in Fig. 3. Based on them, the ages of individuals were calculated when they reached a mass of 1.4 g in these intervals, which corresponds to the duration of the juvenile period (D_j). With an increase in temperature (t , °C), the D_j values of marbled crayfish decrease, and the specific growth rate (r , day⁻¹) during the period of juvenile growth increases (Fig. 2). The relationship between r and t is linear:

$$r = -0.0123 + 0.0019t. \quad (9)$$

The value of t at which $r = 0$ is 6.4 °C. This temperature is the lower temperature limit for the growth of juvenile marbled crayfish (Fig. 4).

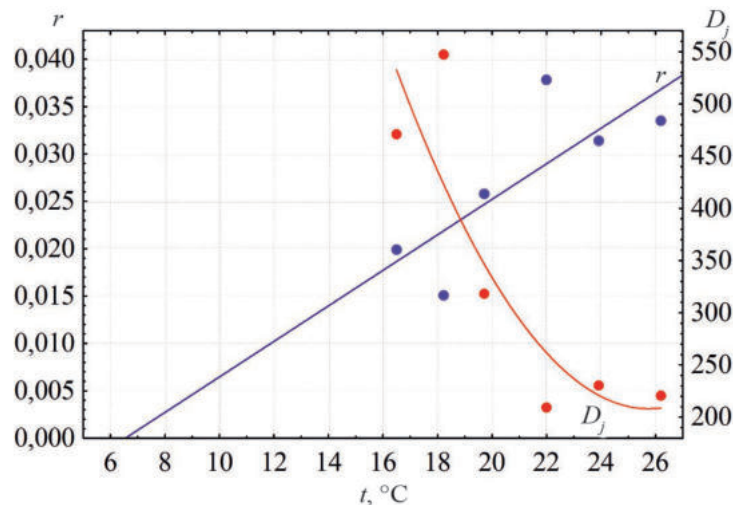


Fig. 4. Temperature dependence of the duration of the juvenile period of marbled crayfish (D_j , day) and the specific growth rate during this period (r , day⁻¹)

The t_0 value we obtained for the juvenile growth of marbled crayfish is close to the results of R. Seitz, et al. [31]. They experimentally raised newborn individuals of this species constant temperatures of 15 °C, 20 °C, 25 °C and 30 °C until the age of 104–195 days. The value of t_0 for the specific growth rate of individuals for the first 100 days of their growth, calculated by us based on the data of these authors, was 7.6 °C.

Consequently, the lower temperature limit for the growth of juvenile marbled crayfish can be taken to be close to 7 °C. From here, the sum of effective temperatures (S_{ef} , degree · days) for the juvenile period (D_j , day) of this species can be calculated according to:

$$S_{ef} = D_j(t - t_0), \quad (10)$$

where t is the average temperature for the juvenile period.

According to the results of our experiments, the average value of S_{ef} for the juvenile period of marbled crayfish in different temperature intervals is 4316 degree · days. The average weight of newborn marbled crayfish is 7 mg, and the average weight of individuals that have begun to produce viable clutches is 1.4 g. Hence, the increase in the mass of individuals during the juvenile period is 1.39 g. Consequently, the sum of effective temperatures required for an increase in the mass of juveniles by 1 g is equal to $4316 / (1.4 \text{ g} - 0.007) \cdot 3 = 3098$ degree · days.

We were unable to find specific data on the growth or lifespan of marbled crayfish in natural reservoirs in the literature. According to our data, its lifespan in the laboratory at an average annual temperature close to 20 °C does not exceed 2–2.5 years, and its maximum weight reaches 15–20 g [32].

According to calculations using equation (8), the age of reaching a body weight of 15 g was reduced by increasing temperature from 1349 to 707 days (Fig. 5). As for the juvenile period, an increase in the specific

growth rate in mature females during the growth period from 1.4 to 15 g with increasing temperature, is described by a linear function:

$$r = -0,0006 + 0,0002t. \quad (11)$$

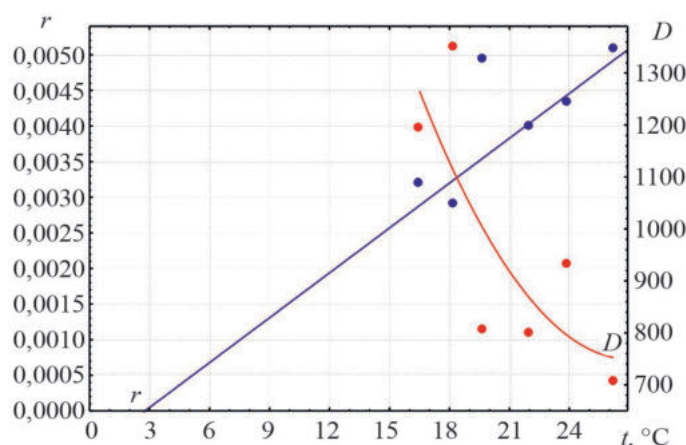


Fig. 5. Temperature dependence of the age at which marbled crayfish individuals reach a body weight of 15.0 g (D , day) and the specific speed of sexually mature individuals (r , day⁻¹)

From equation (11) it follows that the lower temperature limit for the growth of sexually mature marbled crayfish is 3 °C, which corresponds quite well to the available literature data. Thus, the survival rate of *P. virginalis* in a natural reservoir in the Czech Republic over a 240-day period, entirely including the winter months, was 25 % [33]. Most of the deaths of individuals occurred precisely during the cold period of the year, when the water temperature dropped to 2–3 °C. At the same time, all surviving individuals did not feed in winter, being motionless and essentially in a state of suspended animation. The exit from it occurred only when the water warmed up in April to 5–7 °C.

In individuals of this species kept from September to April in an outdoor pool, molting was observed even when the water temperature in it dropped to 5.1–9.5 °C [34].

The value of the sum of effective temperatures for the growth period from 1.4 to 15 g in all temperature intervals we studied averages 10 630 degree·days. Therefore, to increase the body weight of sexually mature individuals by 1 g, a sum of effective temperatures equal to 10630: $(15.0 - 1.4) \approx 782$ degree·days is required. Since the frequency of molts in sexually mature individuals of marbled crayfish is weakly dependent on temperature, with Q_{10} in the range of 1.15–1.38 (Fig. 2), changes in temperature will have only a small effect on the growth rate of sexually mature individuals.

If the temperature of the water in a reservoir for each day of the year (t_i) is known, the annual sum of temperatures (S_{sum}) of the water in it can be calculated by summing:

$$S_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{365} (t_i, ^\circ\text{C}). \quad (12)$$

However, for the purposes of our research, it is important to know not only the annual sum of temperatures or the average annual temperature, but also the nature of temperature changes throughout the year. However, in most cases, there is no data on daily temperature values in water bodies or in their biotopes where crayfish live. In this case, the annual sum of temperatures can be determined with sufficient accuracy from changes in average monthly temperatures or even from temperatures for individual dates. However, it is desirable that these data cover all seasons of the year or at least the ice-free period.

The curves of annual temperature changes in continental water bodies are not strictly symmetrical for many natural and climatic reasons. The period of the year with maximum temperatures almost always occurs at the end of July – the first half of August. In the reservoirs of the Southern Hemisphere, on the contrary, minimum temperatures are observed during this period of the year. As an example, let's look at the change in average monthly temperatures in the Zaslavskaye reservoir (Table 3).

Annual changes in water temperature in it (t , °C), as in other model reservoirs, are well described by the polynomial equation of a 5th degree:

$$t = a\tau^5 + b\tau^4 + c\tau^3 + d\tau^2 + e\tau + f, \quad (13)$$

where τ is the serial number of the day in the year, counting from January 1st ($\tau = 1$), a , b , c , d , e and f are empirical constants.

Table 3

Parameters of equation (13) describing annual changes in water temperature (t , °C) in water bodies within the invasion area of *Procambarus virginalis* during the year (τ , ordinal number of days counted from January 1st)

Water body, localisation	Equation
Water body near Jönköping in Southern Sweden	$t = 1,4442E^{-10}\tau^5 - 1,1117E^{-7}\tau^4 + 2,5091E^{-5}\tau^3 - 0,0012\tau^2 - 0,0513\tau + 4,7388$
Zaslavskaye reservoir near Minsk, Belarus	$t = 1,3331E^{-10}\tau^5 - 9,2227E^{-8}\tau^4 + 1,6072E^{-5}\tau^3 + 0,0002\tau^2 - 0,0837\tau + 4,4737$
Water body in Frankfurt am Main, Germany	$t = 1,0697E^{-10}\tau^5 - 7,5621E^{-8}\tau^4 + 1,3638E^{-5}\tau^3 - 0,0233\tau^2 - 3,0963E^{-5}\tau + 4,9113$
Water body in Bratislava, Slovakia	$t = 1,2123E^{-10}\tau^5 - 8,9101E^{-8}\tau^4 + 1,7945E^{-5}\tau^3 - 0,0006\tau^2 + 0,0097\tau + 3,6998$
Plain Dojran Lake, North Macedonia	$t = 9,2464E^{-11}\tau^5 - 6,578E^{-8}\tau^4 + 1,1323E^{-5}\tau^3 + 0,0001\tau^2 + 0,0061\tau + 5,2108$
Monkey Bay of Nyasa Lake, Malawi, East Africa	$t = -2,2873E^{-11}\tau^5 + 1,3447E^{-8}\tau^4 - 7,9151E^{-7}\tau^3 - 0,0005\tau^2 + 0,0445\tau + 27,6135$

The definite integral of function (13) in the range from $\tau = 1^{\text{st}}$ day (January 1) to $\tau = 365^{\text{th}}$ days (December 31) is the sum of active water temperatures (S_{sum}) in a reservoir for an astronomical year. The values of S_{sum} calculated in this way differ from those determined, according to (12), by no more than 5 % in both directions. This accuracy is quite acceptable for the purposes of this study, given the significant fluctuations in the average annual temperature of water bodies in different years.

The lower temperature limits for the passage of individual stages of ontogenesis in crayfish differ significantly (Fig. 5). The exact lower (τ_{min} , day) and upper (τ_{max} , day) boundaries of these intervals can also be calculated using equation (13), using the t_0 values for the corresponding stages of ontogenesis. Integrating equation (12) in the range $\tau_{\text{min}} - \tau_{\text{max}}$ allows one to determine the sum of temperatures over this range (S_{sum}).

However, for the rates of many biological processes in poikilothermic organisms, the most important factor is not temperature as such, but effective temperature (S_{ef}). It is equal to the difference between the temperature of the environment (t , °C) and the temperature of biological zero, or the lower temperature limit for the occurrence of this process (t_0 , °C).

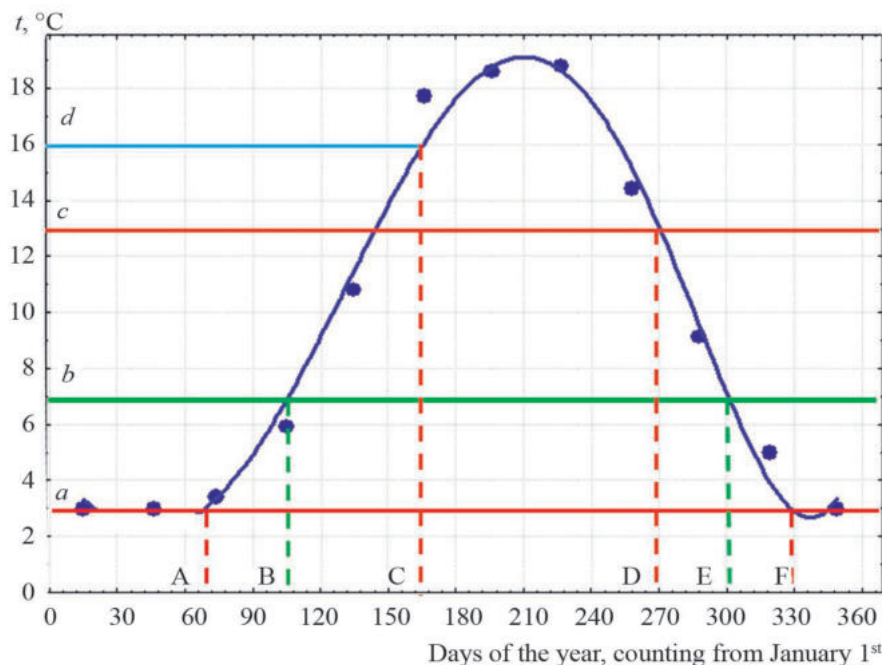


Fig. 6. Changes in monthly temperatures in the Zaslavskaye reservoir in 2023 according to the data of the Internet resource <https://seatemperature.info/>. The curve is the line of equation (13), the parameters of which are given in Table 3: line a – lower temperature limit of growth of sexually mature individuals; line b – lower temperature limit of juvenile growth; line c – lower temperature limit of embryonic development and growth of newborn individuals; line d – temperature of the beginning of clutch emergence by females in natural water bodies of the temperate zone. Range AF – the period of the year when growth of sexually mature individuals occurs. The BE range is the period of the year when juvenile growth occurs. Range CD – the period of the year when embryonic development and growth of newborn individuals occurs

The sum of effective temperatures for the period of the year ($d\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min}$) in which a certain stage of ontogenesis occurs (S_{ef}) can be calculated according to:

$$S_{\text{ef}} = \left[\left(\frac{S_{\text{sum}}}{d\tau} \right) - t_0 \right] \delta\tau, \quad (14)$$

where S_{sum} is the sum of temperatures for the interval of the year in which a certain stage of ontogenesis occurs, calculated by integrating function (5) in the interval from $\tau_{\min}$ to $\tau_{\max}$, $\delta\tau$ is the duration of this interval (days), t_0 is the temperature of biological zero for a given stage of ontogenesis, °C.

However, females of the marbled crayfish in water bodies of the temperate zone begin to lay eggs only after the spring warms up of the water to 16 °C [33], which is significantly higher than the t_0 value for the embryonic development of the marbled crayfish, equal to 13.1 °C [34]. This circumstance must be taken into account when calculating S_{ef} according to (14) for time periods in water bodies in which embryonic development of marbled crayfish can actually occur. In this case, this period begins when the water temperature in the reservoir warms up to 16 °C in the spring, and ends when it drops to 13 °C in the fall. In fact, this period of time is the breeding period for marbled crayfish in natural reservoirs.

In marbled crayfish, the values of t_0 for passing through different stages of life stages in ontogenesis decrease, and the duration and sum of effective temperatures for their passage, on the contrary, increase. Thus, the duration of embryogenesis in him with an increase in temperature from 16–17 °C to 26–27 °C is reduced from 66–69 days to 21–24 days. The S_{ef} values for the period of embryogenesis average 299 degree·days, and the lower temperature threshold of embryonic development is 13.1 °C. In juveniles with a body weight of up to 0.32 g, the lower temperature limit for molting occurs, i. e. body weight growth is the same – 13–14 °C. At the same time, the upper temperature limit for the survival of developing embryos and newborn marbled individuals is a temperature of 27 °C [32].

The lower temperature limit for the growth of juvenile marbled crayfish is 7 °C (Fig. 4), and for mature individuals it decreases to 3 °C (Fig. 5). The age at which the marbled crayfish reaches sexual maturity, even at temperatures ranging from 20 to 26 °C, is at least 200 days, and the average value of the sum of effective temperatures for this period reaches 4316 degree·days.

Therefore, the boundaries and duration of the periods of the year in which these processes can occur in natural reservoirs, as well as the sum of effective temperatures in these periods, will vary significantly (Fig. 6). The parameters of equations (13), which describe the annual variation of temperatures in model reservoirs, are given in Table 3.

The period of the year with temperatures favorable for embryonic development increases as one moves from north to south (Fig. 6). However, temperatures of 27 °C and above are lethal for embryos and newborn juveniles of marbled crayfish [32]. Therefore, in freshwater bodies of the tropical island of Madagascar (an analogue of which is Nyasa Lake), the embryogenesis of marbled crayfish can occur only in the period from April to October, when the temperature in them drops below 27 °C.

On the other hand, the upper temperature limit for the existence of juvenile and mature individuals of this species exceeds 30 °C, so they are able to grow in tropical waters throughout the year.

The boundaries of the passage of individual stages of ontogenesis in *P. virginalis* in model reservoirs and the sum of effective temperatures for these periods are presented in Table 4. The shortest period of the year (only 70 days) with temperatures at which embryogenesis of the marbled crayfish can actually occur occurs in the reservoirs of the South Sweden. However, due to low summer temperatures, the S_{ef} value for this period is only 166 degree·days, or 1.8 times lower than the S_{ef} value required for the embryonic development of marbled crayfish.

Obviously, in such temperature conditions, complete development of clutches in one growing season is impossible. Therefore, the possibility of reproduction of *P. virginalis* populations in the region of Southern Sweden seems very doubtful. However, 13 specimens of marbled crayfish were discovered in the small river Märstaån near Stockholm [26]. However, these authors themselves express reasonable doubts about the ability of this species to create sustainable populations in the waters of Southern Sweden. Most likely, the adult individuals they found in this river were brought there only once.

On the other hand, in the reservoirs of the city of Dnieper (Ukraine), egg-bearing females of *P. virginalis* were found even at the end of October, when the water temperature dropped below 10 °C [35]. Most likely, their clutches were swept out in late summer – early autumn, when the temperature of the reservoir still exceeded 13 °C. In this case, at the end of October, *P. virginalis* eggs could already be in the stage of winter embryonic diapause, typical for crayfish of the temperate zone. At the same time, the ability of eggs and embryos of the marbled crayfish, which is subtropical in its region of origin, to survive a long and cold winter period in water bodies of the temperate zone remains unclear. In any case, we were unable to find information about the presence of egg-bearing females of this species in the waters of Europe during the winter months.

Table 4

Boundaries of individual stages of ontogenesis in *Procambarus virginalis* in natural water bodies and sums of effective temperatures for these periods

Water body, localisation	Sum temperatures in the reservoir for the year, degree·days	Boundaries period of reproduction, embryogenesis and growth of newborns*, days	The sum of effective temperatures for this period, degree·days	Limits of juvenile growth period*, days	Sum of effective temperatures for this period, degree·days	Limits of growth period of sexually mature individuals*, days	Sum of effective temperatures for this period, degree·days
Water body near Jönköping in Southern Sweden	3158	$\frac{206 - 275}{70}$	166	$\frac{133 - 316}{184}$	1083	$\frac{1 - 20 \text{ и } 100 - 365}{286}$	2031
Zaslavskaye reservoir near Minsk, Belarus	3442	$\frac{163 - 275}{113}$	543	$\frac{105 - 307}{203}$	1567	$\frac{69 - 330}{262}$	2493
Water body in Frankfurt am Main, Germany	4491	$\frac{146 - 288}{143}$	850	$\frac{79 - 321}{243}$	2099	$\frac{1 - 365}{365}$	3324
Water body in Bratislava, Slovakia	4396	$\frac{148 - 284}{153}$	837	$\frac{1 - 365}{365}$	1841	$\frac{1 - 365}{365}$	3301
Plain Dojran Lake, North Macedonia	5749	$\frac{122 - 302}{201}$	1550	$\frac{53 - 329}{279}$	2990	$\frac{1 - 365}{365}$	4657
Monkey Bay of Nyasa Lake, Malawi, East Africa	9613	$\frac{110 - 300^{***}}{191}$	2129	$\frac{1 - 365}{365}$	7076	$\frac{1 - 365}{365}$	8518

*In the numerator – ordinal numbers of days of the year, counted from January 1st. The first digit is the day when the water temperature in the reservoir reached 16 °C, the second – when it decreased to 13.1 °C; in the denominator – duration of the period of the year in this temperature range.

**Until the body weight reached 15 g.

***Period of the year when water temperature did not exceed 27 °C.

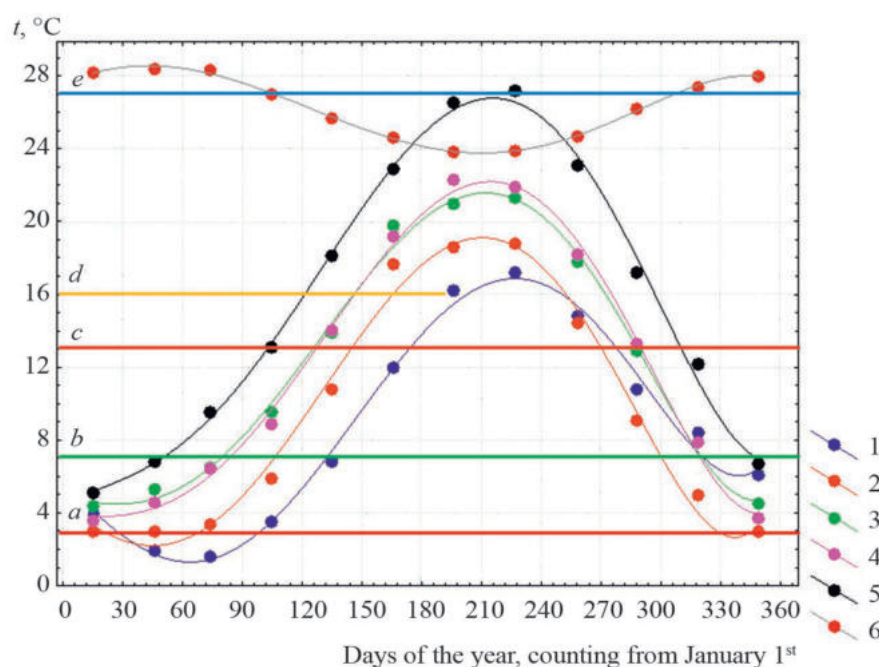


Fig. 7. Annual changes in mean monthly temperature (t , °C) in freshwater bodies in different climate zones in 2023. Based on data from <https://seatemperature.info/>. 1. Lake in Southern Sweden. 2. Zaslavskaye reservoir (Belarus). 3. A body of water in Frankfurt am Main (Germany). 4. A water body in Bratislava (Slovakia). 5. Doiran Lake (Northern Macedonia). 6. Monkey Bay, Lake Nyasa (Malawi). Line a – Lower temperature limit for growth of sexually mature individuals; line b – lower temperature limit for growth of juveniles; line c – lower temperature limit for embryonic and neonatal growth; line d – temperature at which females begin to deploy their clutches in natural waters of the temperate zone; line e – upper temperature limit for embryonic and neonatal growth

In more southern reservoirs of Belarus, Germany, Slovakia and North Macedonia, the duration of the reproduction period of the marbled crayfish is significantly longer, and the S_{ef} value in it exceeds the similar value for embryonic development. Consequently, in these reservoirs, females are able to fully tolerate a clutch of eggs, and the juveniles hatched from them can continue to grow for quite a long period of time.

An important limiting factor for natural populations of marbled crayfish is the high mortality of juveniles in winter. Thus, the survival rate of juveniles (average weight 0.9 g) in open concrete tanks in northeastern Estonia from September 2011 to April 2012 was only 8 %. At the same time, the peak of mortality occurred in the coldest months – January and February. In sexually mature individuals (average weight 2.1 g), under the same conditions, survival rate reached 60 % [34].

However, even juveniles that have successfully overwintered in European water bodies are not able to reach sexual maturity during the second growing season in their life cycle. To achieve sexual maturity, juvenile marbled crayfish require a S_{ef} value of over 3000 degree·days. At the same time, the corresponding indicator for the growth period of juveniles in water bodies of Belarus, Germany and Slovakia for the period of the year with temperatures above 7 °C varies within the range of 1567–2099 degree·days (Table 5). The same figure in the warmer Lake Dairen reaches almost 3000 degree·days. However, even if some individuals at the end of this period are able to lay a viable clutch, then in the coming cold period of the year it will most likely die.

Consequently, as a result of the reservoirs of the temperate zone of Europe, newborn individuals of marbled crayfish are able to begin to reproduce only in the third year of life. According to our observations, female marbled crayfish never produced a repeat formula immediately after the juveniles emerged from the previous ones. Always soon after the juveniles hatched from the eggs, the females molted shedding their exoskeleton with the remains of hyaline filaments. They issued repeated egg clutch, and not always, only after another molt. In sexually mature individuals, intermolt intervals, even at temperatures above 20 °C, are quite long – at least 25 days (Fig. 1). Therefore, the second clutch during the growing season in natural reservoirs will develop at rapidly decreasing autumn temperatures, which will negatively affect the survival of embryos.

Therefore, during their third growing season in the reservoirs of Germany and Slovakia, they will be able to produce one clutch, and perhaps two clutches in the warmer reservoirs of the Balkan Peninsula.

In contrast to the reservoirs of Europe, in tropical reservoirs there is no cold period of the year, which limits the growth of not only sexually mature, but also juvenile individuals. Therefore, newborn juveniles are able to reach sexual maturity in them by the age of 200 days and produce up to 3–4 clutches in two seasons of the year with temperatures favorable for embryonic development (below 27 °C).

Reproduction through parthenogenesis significantly increases the invasive potential of the marbled crayfish, since theoretically a new invasive population can be founded by a single mature female that has produced at least one viable clutch during its life cycle. In contrast, the establishment of invasive populations of bisexual crayfish species requires large enough groups of heterosexual individuals to increase the likelihood of their contacts during the breeding season.

However, the reproductive capacity of marbled crayfish is significantly lower than that of bisexual species. In our experiments [32], clutches were produced by no more than 50 % of sexually matured individuals kept in individual vessels. Moreover, up to 80 % of all clutches produced were non-viable. In most cases, breeding females produced one viable clutch during their life cycle, and only in exceptional cases – two such clutches. These results are quite consistent with the available literature data [36]. According to them, among female marbled crayfish kept by US aquarists, 38.5 % did not reproduce, 23.0 % produced only one clutch, and only 38.5 % produced several clutches.

Therefore, low clutch viability and very high mortality of juveniles during the cold season significantly reduce the invasive potential of marbled crayfish. Hence, its spread across Europe is significantly lower than that of other North American invasive species: the signal crayfish *Pasifastacus leniusculus*, the striped crayfish *Faxonius (Orconectes) limosus*, and the red swamp crayfish *Procambarus clarkii*. The first two species originate from the temperate zone of North America and are therefore well adapted to low winter temperatures. In contrast, the red swamp crayfish, like the marbled crayfish, comes from the subtropics of North America.

The native area of the signal crayfish in North America covers the extreme south of British Columbia (Canada), the states of Washington, Oregon, Idaho and northern California (USA). It is not highly resistant to elevated temperatures, which limits its ability to move into warmer subtropical regions. The optimal temperature for the development of eggs of this species in artificial conditions is 12–14 °C, at which their survival rate reaches 90–98 %. For individuals under one year of age, an average annual temperature of 18 °C is considered optimal [37]. However, the maximum growth rate of individuals was noted at 23 °C [38].

In 1961, *P. leniusculus* was first introduced to Sweden and then to other European countries as a potential aquaculture object [26], but it quickly began to spread to natural reservoirs. Now in Europe, among the invasive species of crayfish, the signal crayfish has the most extensive range. It extends from Sweden, Finland and Great Britain in the north, to Spain, Croatia and Greece in the south. At the southern border of its European range,

the signal crayfish lives in colder mountain reservoirs. The eastern border of its range is Lithuania, Poland, the Kaliningrad region of the Russian Federation and the Daugava River (Western Dvina) in Latvia, up to the city of Daugavpils in close proximity to the border with Belarus. But in Belarus, despite long-term searches, signal crayfish has not been discovered.

On the other hand, low winter temperatures in natural reservoirs (up to 2–3 °C) do not block the growth of not only adult individuals, but also juveniles of *P. leniusculus*. Thus, their newborn individuals raised in the laboratory from July to May on running water coming from nearby Lake Mälaren (Central Sweden) reached an average weight of 300 mg in October, and over 500 mg in May. At the same time, the water temperature from October to May varied within 2–5 °C. The survival rate of juveniles during the entire period of the experiment reached 40 % [39].

In water bodies of Poland, female of signal crayfish reach sexual maturity at the end of the second growing season (body size 8 cm, weight 16 g) and produce the first clutch of eggs, the young of which will hatch at the beginning of the next growing season [40]. The lifespan of this species in natural reservoirs can last 10 years or more. Therefore, females can produce as much as 7–8 clutches during their life cycle.

The striped crayfish *F. limosus* is the first alien crayfish species in Europe. Its maternal range includes the northeastern United States and southeastern Canada. It was first introduced in 1890 to the east of the German Empire (now the territory of Poland) with the aim of introducing it into natural reservoirs to compensate for the sharp decline in the population of the native noble crayfish *A. astacus*, which was the most important in Europe commercial species, due to repeated pandemics of crayfish plague [41]. Then striped crayfish was repeatedly introduced into reservoirs in different regions of Germany, Poland and France, and in the interwar years they were even grown in aquaculture. However, due to its small size and robust outer covers, it was not in great demand on the market.

From the areas of initial introduction and aquaculture, striped crayfish quickly spread across numerous water bodies in Europe. It currently ranges from the Atlantic coast of France to the Balkan Peninsula and from Italy to Lithuania and Latvia. In Belarus *F. limosus* was first discovered in 1997 in the Black Gancha River (a tributary of the Neman River) at the junction of the borders with Poland and Lithuania. In the period from 2003 to 2009, it was recorded in several small rivers of the Western Bug basin. By 2016, this species had spread along the Shchara River up to the city of Slonim, and later along the Viliya River (both tributaries of the Neman River) to the dam of the Vileika Reservoir. In 2022, it was discovered in the Slepjanskaya water system of Minsk [42].

Striped crayfish, compared to signal crayfish, have a significantly wider range of temperature tolerance. It tolerates low winter water temperatures well. At the same time, the range of temperatures favorable for its growth and development is quite wide – from 15 to 33 °C. Therefore, it was successfully acclimatized not only in Europe, but also in much warmer Mexico.

In the reservoirs of the Czech Republic, female striped crayfish lay eggs from the second half of April to the first half of May. In a flow-through incubation unit, where the water temperature varied within 7–17 °C, the duration of embryonic development averaged 46 days. Females hatched in the first half of summer reach sexual maturity in the autumn of the same year with a minimum body size of 45 mm and a weight of 2.25 g [43] and will begin to reproduce in the next growing season. Along with rapid growth and sexual maturation, the spinycheek crayfish is characterized by increased resistance to pollution of water bodies and low oxygen content in water.

Like the signal crayfish *P. clarkii*, the striped crayfish produces one clutch per growing season. Since the life span of the latter does not exceed two to three years, it is capable of producing no more than two clutches during its life cycle.

The maternal area of the red swamp crayfish is northern Mexico, southern and southeastern United States. In the USA, its cultivation began in the 19th century. Now this species is widely cultivated in China, Kampuchea, Thailand, Ethiopia, Canada, Australia and New Zealand, and in recent decades – in Europe, primarily in Spain. However, from crayfish farms it penetrates everywhere into natural water bodies, thus becoming an additional risk factor for native crayfish.

The current range of *P. clarkii* in continental Europe extends from the Iberian Peninsula to Italy, Germany, Austria and Poland. It is also found in the south of Great Britain, in Sicily, Sardinia, Corsica and the Balearic Islands [44]. He also entered the river. Nile in Egypt [45], into reservoirs in the west of the Japanese island of Hokkaido [46].

Despite its subtropical origin, the red swamp crayfish is a highly eurythermic species, capable of existing in a very wide range of temperatures. In reservoirs of Germany and Poland it survives at low winter temperatures close to 2–3 °C, and in Egypt (lower reaches of the Nile River) in summer it exists at temperatures up to 26–29 °C. Embryonic development in this species can occur in the range from 7 °C (150 days) to 31 °C (11–14 days) [45; 47].

The sum of effective temperatures (S_{ef}) calculated by us based on the data of these authors for the embryonic development of *P. clarkii*, equal to 270 degree·days, is close to that for the marbled crayfish – 298 degree·days.

However, the lower temperature threshold of embryonic development (to) in *P. clarkii* is significantly lower than in the marbled crayfish – 9.0 and 13.1 °C, respectively.

In *P. clarkii* populations from water bodies of Europe and Japan, egg-bearing females appear in the second half of summer, when water temperatures reach their maximum annual values [44; 46]. At temperatures ranging from 20 to 25 °C, the duration of embryogenesis does not exceed three weeks. However, females continue to carry hatched larvae until their third molt. According to laboratory experiments, the gestation period of larvae at an average temperature close to 24.5 °C takes another 25 days [46]. If we assume that the lower temperature limit for growth of *P. clarkii* larvae for the first three intermolt periods is the same as for embryonic development (i. e. 9 °C), as established for *P. virginalis* [33], then the total sum of effective temperatures for the periods embryogenesis and gestation of young by females is $270 + 388 = 658$ degree·days.

Consequently, in water bodies of the temperate zone with a long autumn-winter period, females of *P. clarkii*, taking into account the late timing of the hatching of juveniles, are capable of producing no more than one clutch of eggs during the growing season. However, even juveniles that have switched to an independent lifestyle will find themselves in conditions of constantly decreasing temperatures in the autumn-winter period, which will significantly reduce their growth rate and lengthen the juvenile period. Therefore, in the temperature conditions of water bodies of the temperate zone, juveniles of this species reach the minimum size of sexually mature individuals (body size 60 mm) at the age of at least 5 months, i. e. will begin to reproduce in the next growing season.

The lifespan of *P. clarkii* in nature is usually no more than 3–4 years. Consequently, during its life cycle, its females are capable of producing 2–3 clutches of eggs. In warmer water bodies of the subtropical and tropical zones, there is no long autumn-winter period, and the age of reaching sexual maturity is reduced to three months. In this case, females can produce two clutches during a long growing season.

In contrast to the above species, *P. virginalis*, although it has a fairly wide range in Europe, is found in only a small number of water bodies. In some of them, only single adult individuals were found one time, the further fate of which remained unknown. A number of populations of this species are also known that have existed for quite a long time. They are found mainly in the southern parts of their range with a warmer climate and long growing and breeding seasons. However, even in the warmer Doiran Lake on the Balkan Peninsula, the marbled crayfish reaches sexual maturity only in the third growing season, i. e. one year later than the signal and striped crayfish. Only on the tropical island of Madagascar can the growth of juvenile and mature female marbled crayfish continue year-round. Therefore, in a few years it not only spread throughout this island, but also became a common and even commercial species here [16].

One of the most important indicators of the invasive potential of alien species is the maximum instantaneous rate of population growth ($r_{\max}$). The higher the $r_{\max}$, the faster the population size increases, which deprives the population with a lower growth rate of food and biotopic resources [22]. The value of $r_{\max}$ can be approximately calculated according to:

$$r_{\max} \approx \frac{\ln(\alpha_1 \alpha_2 F)}{T}, \quad (15)$$

where α_1 is the survival rate of newborn females in the juvenile period, expressed in fractions of unity, α_2 is the proportion of breeding females in the total number of sexually mature individuals, F is the average number of juveniles born by females during the life cycle, T is the generation time in the population.

The crayfish generation time (T) can be approximately taken equal to:

$$T = \frac{T_1 + T_d}{2}, \quad (16)$$

where T_1 and T_d are the average age of females when they lay their first and last clutches in years. T_d usually corresponds to the maximum lifespan of females under natural conditions.

Fecundity (F) of the listed North American invasive crustacean species is quite comparable. In females of the maximum age and maximum size, it reaches 300–500 eggs. The sex ratio in natural crayfish populations is close to 1:1, hence $\alpha_2 \approx 0.5$. The only exception is the parthenogenetic marbled crayfish, all individuals of which are females, i. e. theoretically it has $\alpha_2 = 1.0$. However, since not all sexually mature females in this species produce viable offspring, the real values of α_2 in its natural populations are most likely significantly lower. The survival rate of all types of crayfish in the juvenile period (α_1) in natural reservoirs is very low, usually no more than 0.01–0.05. Logarithm of the values of α_1 , α_2 and F in (15) largely eliminates even their significant (up to 3–5 times) differences in different crayfish species.

Conclusion

Based on (15), the generation time (T) has a significantly stronger effect on $r_{\max}$ for crayfish populations than other parameters of the life cycle of the individual. The shorter T , the higher the growth rate of their populations. In water bodies of the temperate zone with a long autumn-winter season periods with low winter temperatures,

slowing down or even blocking the processes of embryonic development and growth of female crayfish, the latter are capable of producing no more than one clutch of eggs per life cycle.

In such circumstances the signal, striped and red swamp crayfish, which begin to reproduce already in the second growing season, will have an undoubted advantage not only over the native European noble crayfish *A. astacus*, narrow-clawed crayfish *Astacus leptodactylus*, white-clawed crayfish *Austropotamobius pallipes* and stone crayfish *Aus. torrentium*, but also invasive marbled crayfish, which begin to reproduce 2–3 years later.

This conclusion is confirmed by numerous examples. In Belarus, the striped crayfish is gradually replacing the long-clawed crayfish [48]. The signal crayfish in Sweden and Finland displaces the broad-clawed and long-clawed crayfish [49], in the UK – the white-clawed crayfish [50], and in Germany – the stone crayfish [51]. And such examples are far from unique.

In the foreseeable future, invasive crayfish species in Europe will enter into intense competition with each other, the outcome of which is currently difficult to predict. However, it is quite possible to predict it if, using the model we have developed, we determine the temperature limits for embryonic development, growth and reproduction of individuals and the sum of effective temperatures for passing through these stages of ontogenesis.

References

1. Kouba A, Oficialdegui FJ, Cuthbert RN, Kourantidou M, South J, Tricarico E, Gozlan RE, Courchamp F, Haubrock PJ. Identifying economic costs and knowledge gaps of invasive aquatic crustaceans. *Science of the Total Environment*. 2022;813:152–325.
2. Holdich DM, Reynolds JD, Souty-Grosset C, Sibley PJ. A review of the ever-increasing threat to European crayfish from non-indigenous crayfish species. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2009;11:394–395.
3. Gherardi F. et al. Managing invasive crayfish: is there a hope? *Aquatic Sciences*. 2011;73(2):185–200.
4. Kozák P, Füreder L, Kouba A, Reynolds J, Souty-Grosset C. Current conservation strategies for European crayfish. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2011; 401:01–08.
5. Lyko F. The marbled crayfish (Decapoda: Cambaridae) represents an independent new species. *Zootaxa*. 2017;4363(4):544–552.
6. Martin P, Dorn NJ, Kawai T, van der Heiden C. The enigmatic Marmorkrebs (marbled crayfish) is the parthenogenetic form of *Procambarus fallax*. *Contributions to Zoology*. 2010;79(3):107–118.
7. Gutekunst J, Andrianjosa R, Falckenhayn C, Hanna K, Stein W, Rasamy J, Lyko F. Clonal genome evolution and rapid invasive spread of the marbled crayfish. *Nature Ecology and Evolution*. 2018;2:567–573.
8. Stegnij VN. Arhitektonika genoma, sistemnye mutacii i evolyuciya. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGU; 1993. 143. Russian.
9. Gutekunst J, Maiakovska O, Hanna K, P Provataris P, Horn H, Wolf S, Skelton CE, Nathan J, Dorn NJ, Lyko F. Phylogeographic reconstruction of the marbled crayfish origin. *Communications Biology*. 2021;4:1096.
10. Chucholl C. Invaders for sale: Trade and determinants of introduction of ornamental freshwater crayfish. *Biological Invasions*. 2013;15:125–141.
11. Faulke Z. Marmorkrebs (*Procambarus fallax* f. *virginalis*) are the most popular crayfish in the North American pet trade. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2015;416:20.
12. Bohman P, Edsman L, Martin P, Scholtz G. The first Marmorkrebs (Decapoda: Astacida: Cambaridae) in Scandinavia. *BioInvasions Records*. 2013;2(3):227–232.
13. Kouba A, Petrusek A, Kozák P. Continental-wide distribution of crayfish species in Europe: update and maps. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2014;413:5–31.
14. Novitsky RF, Son MO. The first records of Marmorkrebs [*Procambarus fallax* (Hagen, 1870) f. *virginalis*] (Crustacea, Decapoda, Cambaridae) in Ukraine. *Ecologia Montenegrina*. 2016;5:44–46.
15. Dobrović A, Maguire I, Boban M, Grbin D, Sandra Hudina S. Reproduction dynamics of the marbled crayfish *Procambarus virginalis* Lyko, 2017 from an anthropogenic lake in northern Croatia. *Aquatic Invasions*. 2021;16(3):482–498.
16. Andrianjosa R, Tönges S, Panteleit J, Theissinger K, Carneiro VC, Rasamy J, Lyko F. Ecological plasticity and commercial impact of invasive marbled crayfish populations in Madagascar. *BMC Ecology*. 2019;19(8):1–10.
17. Kawai T, Takahata M. The Biology of Freshwater Crayfish. *Natural history*. 2010;2:3–119.
18. Charlier P. Mutant invasive crayfish found infesting ponds in Taipei City park. [Internet, cited 2024 March 11]. Available from: <https://taiwanenglishnews.com/mutant-invasive-crayfish-found-infesting-ponds-in-taipei-city-park/>.
19. Yanai Z, Guy-Haim T, Kolodny O, Levitt-Barmatz Y, Mazal A, Morov AR, Sagi A, Noa Truskanov N, Milstein D. An overview of recent introductions of non-native crayfish (Crustacea, Decapoda) into inland water systems in Israel. *BioInvasions Records*. 2024;13:195–208.
20. Lam A. Foreign species of crayfish, hazardous to local ecology, found in Ttaipa. [Internet, cited 2024 March 20]. Available from: <https://macaudailytimes.com.mo/foreign-species-of-crayfish-hazardous-to-local-ecology-found-in-taipa.html>.
21. Crandall KA. *Procambarus fallax*. The IUCN Red List of Threatened Species 2010 Crandall. [Internet, cited 2024 March 22]. Available from: <http://www.iucnredlist.org/details/153961/0>.
22. Pianka ER. Evolutionary ecology. 7th edition. [Internet, cited 2024 March 26]. Available from: https://books.google.by/books?id=giFL5bonGhQC&pg=PA1&hl=ru&source=gbv_toc_r&cad=2#v=onepage&q&f=true.
23. Hmeleva NN, Golubev AP. Produktivnaya kormovyy i promyslovyy rakooobraznyh. Minsk: Science and technology; 1984. 216 p. Russian.
24. Golubev AP, Ulashchik EA. Mathematical modelling of the processes of continuous growth of the noble crayfish *Astacus astacus* (Decapoda, Astacidae) under aquaculture conditions. In: Actual problems of wildlife protection in Belarus and neighbouring regions: proceedings of the II International Scientific and Practical Conference. Minsk: [publisher unknown]; 2022. p. 106–112. Russian.
25. Khmeleva N, Golubev A. La production chez les Crustacés. Rôle dans les écosystèmes et utilisations. Brest (France): Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer; 1986. p. 198. French.
26. Bohman P, Edsman L. Marmorkräften i Märstaån. Riskanalys och åtgärdsförslag. *Aqua reports*. 2013; 17: 1–115.

27. Ulashchik K, Zhu Y. The aquarium pet trade as a source of potentially invasive crayfish species in Belarus. In: Actual environmental problems – 2023: Proceedings of the XIII International Scientific Conference of young scientists, graduates, master and PhD students. Minsk: ISEU BSU; 2023. p. 201–202. Russian.
28. Martin P, Shen H, Füllner G, Scholtz G. The first record of the parthenogenetic Marmorkrebs (Decapoda, Astacida, Cambaridae) in the wild in Saxony (Germany) raises the question of its actual threat to European freshwater ecosystems. *Aquatic Invasions*. 2010;5(4):397–403.
29. Lipták B, Mojžišová M, Grul'a D, Christophoryová J, Jablonski D, Bláha M, Petrusek A, Kouba A. Slovak section of the Danube has its well-established breeding ground of marbled crayfish *Procambarus fallax* f. *virginalis*. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2017;418:40.
30. Dobrović A, Maguire I, Boban M, Grbin D, Hudina S. Reproduction dynamics of the marbled crayfish *Procambarus virginalis* Lyko, 2017 from an anthropogenic lake in northern Croatia. *Aquatic Invasions*. 2021;16(3):482–498.
31. Seitz R, Vilpoux K, Hopp U, Harzsch S, Maier G. Ontogeny of the Marmorkrebs (marbled crayfish): a parthenogenetic crayfish with unknown origin and phylogenetic position. *Journal of Experimental Zoology*. 2005;303a:393–405.
32. Golubev AP, Ulashchik EA, Bodilovskaya OA, Giginyak YUG. Ocenka invazivnogo potenciala partenogeneticheskogo mramornogo raka *Procambarus virginalis* Lyko, 2017 (Decapoda, Astacidea) v vodoemah umerennoj zony Evropy. *Reports of the National Academy of Science of Belarus*. 2024;68(2):129–137. Russian.
33. Veselý L, Buřič M, Kouba A. Hardy exotics species in temperate zone: can «warm water» crayfish invaders establish regardless of low temperatures? *Scientific Reports*. 2015;5:16340.
34. Kaldre K, Meženin A, Paaver T, Kawai T. A preliminary study on the tolerance of marble crayfish *Procambarus fallax* f. *virginalis* to low temperature in Nordic climate. *Marble Crayfish in Nordic*. Estonia. 2015;4:54–62.
35. Novitsky RA, Son MO. The first records of Marmorkrebs *Procambarus fallax* (Hagen, 1870) f. *virginalis* (Crustacea, Decapoda, Cambaridae) in Ukraine. *Ecologica Montenegrina*. 2016;5:44–46.
36. Jimenez SA, Faulkes Z. Establishment and care of a colony of parthenogenetic marbled crayfish, Marmorkrebs. *Invertebrate Rearing*. 2010;1(1):10–18.
37. Lewis SD. Biology of Freshwater Crayfish. London; UK; Blackwell Science Ltd; 2002. p. 511–540.
38. Firkins I, Holdich DM. Thermal studies on three species of freshwater crayfish. *Freshwater Crayfish*. 1993;9(1):241–248.
39. Jonsson A. Life history differences between crayfish *Astacus astacus* and *Pacifastacus leniusculus* in embryonic and juvenile development, laboratory experiences. *Freshwater Crayfish*. 1995;8:170–178.
40. Śmietana P, Krzywosz T. Determination of the rate of growth of *Pacifastacus leniusculus* in Lake Poblędzie, using polymodal length-frequency distribution analysis. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. 2006;4:1229–1243.
41. Alekhovich A, Buřič M. NOBANIS – Invasive Alien Species Fact Sheet – *Orconectes limosus* [Internet, cited 2024 March 18]. Available from: <https://easin.jrc.ec.europa.eu/easin>.
42. Ulashchik KA, Giginjak YuG. The first record of the invasive North American crayfish *Faxonius limosus* within the water bodies of Minsk (Belarus). In: Actual environmental problems. XII International scientific conference of young scientists, students, master students and postgraduates. Minsk: ISEU BSU; 2022. p. 175–176.
43. Kozák P, Buřič M, Polícar T. The fecundity, time of egg development and juvenile production in spiny-cheek crayfish (*Orconectes limosus*) under controlled conditions. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. 2006;2:1171–1182.
44. Chucholl C. Population ecology of an alien “warm water” crayfish (*Procambarus clarkii*) in a new cold habitat. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2011;401(29):1–21.
45. Fishar MR. Red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) in River Nile. Egypt: National Institute of Oceanography and Fisheries; 2006. p. 1–34.
46. Luong QT, Shiraishi R, Kawai T, Katsuhara KR, Nakata K. Reproductive biology of the introduced red-swamp crayfish *Procambarus clarkii* (Girard, 1852) (Decapoda: Astacidea: Cambaridae) in western Japan. *Journal of Crustacean Biology*. 2023;43:1–11.
47. Shiyu J, Lisa J, Feng H, Mantang X, Ruojing L, Sovan L, Wei L, Jiashou L, Tanglin Z. Optimizing reproductive performance and embryonic development of red swamp crayfish *Procambarus clarkii* by manipulating water temperature. *Aquaculture*. 2019;510:32–42.
48. Alekhovich AV. Rechnye raki Belarusi v sovremennykh usloviyakh: rasprostraneniye, dinamika chislennosti, produkcionno-promyslovyy potencial. Minsk: Belarus science; 2016. p. 303. Russian.
49. Bohman P, Degerman E, Edsman L, Sers B. Exponential increase of signal crayfish in running waters in Sweden – due to illegal introductions? *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*. 2011;401:23.
50. Holdich DM, James J, Jackson C, Peay S. The North American signal crayfish, with particular reference to its success as an invasive species in Great Britain. *Ethology Ecology & Evolution*. 2014;26(2–3):232–262.
51. Chucholl C, Schrimpf A. The decline of endangered stone crayfish (*Austropotamobius torrentium*) in southern Germany is related to the spread of invasive alien species and land-use change. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 2016;26:44–56.

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 535.231.16:614.876.06:621.039.58

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ПГРЭЗ РАБОТНИКОВ ПОЛЕССКОГО РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

М. А. ШАБАЛЕВА¹⁾, Н. Н. ДЕМЕНКОВЕЦ²⁾, Р. А. НЕНАШЕВ²⁾

¹⁾Гомельский государственный медицинский университет,
ул. Карла Маркса, 11а, 246000, г. Гомель, Беларусь

²⁾Полесский государственный радиационно-экологический заповедник,
ул. Терешковой, 7, 247618, г. Хойники, Гомельская область, Беларусь

Проведен анализ многолетней динамики дозы внутреннего облучения сотрудников Полесского радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ), а также дано определение факторов, обуславливающих варьирование ее показателей у разных категорий обследованного персонала. Проведен статистический анализ дозы внутреннего облучения сотрудников заповедника за 2007–2021 гг. Исследованы результаты 9525 измерений, полученных по результатам контроля дозы внутреннего облучения персонала на спектрометре (счетчике) излучений человека СКГ-АТ 1316.

Образец цитирования:

Шабалева МА, Деменковец НН, Ненасhev РА. Оценка динамики индивидуальных доз внутреннего облучения ПГРЭЗ работников Полесского радиационно-экологического заповедника. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;4:35–43.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-35-43>

For citation:

Shabaleva MA, Demenkovets NN, Nenashev RA. Assessment of the dynamics of individualized internal exposure dose irradiation of PSRER workers of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;4:35–43. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-35-43>

Авторы:

Марина Александровна Шабалева – кандидат биологических наук; доцент кафедры гистологии, цитологии и эмбриологии.

Николай Николаевич Деменковец – заведующий отделом радиационной безопасности и режима.

Роман Алексеевич Ненасhev – старший научный сотрудник отдела радиационно-экологического мониторинга.

Authors:

Maryna A. Shabaleva, PhD (biology); associate professor at the department of histology, cytology and embryology.
hstagom@gmail.com

Nikolai N. Demenkovets, head of the department of radiation safety and regime.

zap-orb@mail.ru

Roman A. Nenashev, senior researcher at the department of radiation-ecological monitoring.
rm@tut.by

Определены многолетние, гендерные, профессиональные, возрастные и локальные различия полученных данных. Выявлено, что уровень дозы внутреннего облучения персонала в большинстве случаев (4317 измерений) не превышает 0,01 мЗв/год, а в 87 % измерений не превышает 0,055 мЗв/год; лишь у 1,3 % сотрудников определены показатели дозы внутреннего облучения были выше 2 мЗв/год. За многолетний период наблюдений наибольшими показателями отличались 2010 и 2011 г. – 0,029 и 0,027 мЗв/год соответственно. Анализ дозы внутреннего облучения у представителей разных специальностей позволил определить самые высокие медианные уровни дозы у охотоведов (0,02 мЗв/год), коневодов, пожарных и водителей, а наименьшие – у инженерно-исследовательского персонала. На основе проведенных измерений персонал заповедника можно разделить на 3 профессиональные группы. Согласно полученным данным уровень дозы внутреннего облучения был статистически значим ($p < 0,05$) выше у мужчин, по сравнению с женщинами, в 2 раза. Среди работников из различных населенных пунктов наибольшие показатели отмечены у жителей г. Наровля (0,3 мЗв/год). Относительно высокие уровни дозы внутреннего облучения определены для сотрудников из д. Березовка и д. Малишев (0,1 мЗв/год). При анализе возрастных зависимостей формирования дозы внутреннего облучения выделено 5 возрастных групп, отличающихся статистически значимыми различиями данного показателя: максимальные уровни выявлены у лиц 35–46 лет (0,015 мЗв/год), а минимальные – в возрасте 18–26 лет (0,007 мЗв/год).

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение; доза внутреннего облучения; ПГРЭЗ; СИЧ-измерения.

ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF INDIVIDUALIZED INTERNAL EXPOSURE DOSE IRRADIATION OF PSRER WORKERS OF THE POLESIE STATE RADIATION-ECOLOGICAL RESERVE

M. A. SHABALEVA^a, N. N. DEMENKOVIC^b, R. A. NENASHEV^b

^a*Gomel State Medical University,
11a Karl Marx Street, Gomel 246000, Belarus*

^b*Polesie State Radiation-Ecological Reserve,
7 Tserashkova Street, Khoyniki 247618, Gomel region, Belarus
Corresponding author: M. A. Shabaleva (histagom@gmail.com)*

The purpose of the study was to analyze the long-term dynamics of the internal radiation dose of PSRER employees, as well as to determine the factors that determine the variation of its indicators in different categories of the examined personnel. A statistical analysis of the internal radiation dose of the reserve employees for the period from 2007 to 2021 was carried out. The results of 9525 measurements obtained from monitoring the internal radiation dose of personnel on a spectrometer (counter) of human radiation SKG-AT 1316 were studied. Long-term, gender, professional, age and local differences in the obtained data were determined. It was revealed that the level of internal radiation dose of personnel in most cases (4317 measurements) does not exceed 0.01 mSv/year, and in 87 % of measurements it does not exceed 0.055 mSv/year; only 1.3 % of employees had internal radiation dose indicators higher than 2 mSv/year. Over the long-term observation period, the highest values were observed in 2010 and 2011 – 0.029 and 0.027 mSv/year, respectively. Analysis of the internal radiation dose in representatives of different specialties allowed us to determine the highest median dose levels in gamekeepers (0.02 mSv/year), horse breeders, firefighters and drivers, and the lowest in engineering and research personnel. Based on the measurements, the reserve personnel can be divided into 3 professional groups. According to the data obtained, the level of internal radiation dose was statistically significantly ($p < 0.05$) higher in men than in women (2 times). Among workers from various populated areas, the highest values were noted among residents of the city of Narovlya (0.3 mSv/year). Relatively high levels of internal radiation dose were determined for employees from the villages of Berezovka and Malishev (0.1 mSv/year). When analyzing the age dependencies of the formation of the internal radiation dose, 5 age groups were identified, which were distinguished by statistically significant differences in this indicator: the maximum levels were found in individuals aged 35–46 years (0.015 mSv/year), and the minimum levels were found in individuals aged 18–26 years (0.007 mSv/year).

Keywords: radioactive contamination; internal dose; PSRER; WBC measurements.

Введение

С момента создания Полесского государственного радиационно-экологического заповедника его приоритетными задачами являются природоохранная деятельность, а также мероприятия, направленные на предотвращение пожаров, переноса радионуклидов, мониторинговые исследования и т. д. Вместе с тем не менее важная проблема – обеспечение безопасных условий труда персонала, работающего на загрязненной радионуклидами территории.

Следование существующим нормативам в соответствии с Законом «О радиационной безопасности» в заповеднике проводится индивидуальный дозиметрический контроль, учет, анализ и оценка внешнего и внутреннего облучения персонала¹. Согласно Закону «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий», наиболее значимым критерием ограничения трудовой деятельности на территории радиоактивного загрязнения является средняя годовая эффективная доза облучения населения, которая не должна превышать 1 мЗв², а ее предел при профессиональном облучении составлять 20 мЗв.

Как известно, основными факторами, оказывающими влияние на формирование дозы внутреннего облучения, является, социальный³, в том числе «лесной» фактор, обусловленный потреблением ягод, грибов и дичи [1–4]. За многолетний период мониторинга дозовых нагрузок сотрудников заповедника получен значительный массив данных, анализ которых представляет не только прикладной интерес в рамках соблюдения установленных пределов, но и дает обширный материал для изучения основных закономерностей формирования дозы внутреннего облучения, а также параметров, определяющих ее уровень.

Материалы и методы исследования

Контроль внутреннего облучения персонала ПГРЭС осуществляется на спектрометре (счетчике) излучений человека (СИЧ) СКГ-АТ 1316 с периодичностью 1–2 раза в год. В качестве методического обеспечения руководствовались документацией по эксплуатации прибора [5]. В исследовании использовались данные СИЧ-измерений персонала ПГРЭС за 2007–2022 гг.

В соответствии с рассчитанными коэффициентами Шапиро – Уилка в ходе статистической обработки установлено, что распределение показателей дозы отличается от нормального, являясь логнормальным. При этом распределения показателей возраста, роста и веса имеют характер, близкий к нормальному. Дальнейшая обработка осуществлялась с помощью методов непараметрической и параметрической статистики с использованием программы *Statistica 13.0*.

Количественные данные приведены в виде медианы и квартилей – Me (Q25; Q75). Для сравнения двух независимых выборок применялся непараметрический U-критерий Манна – Уитни. Результаты определяются как статистически значимые при $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

За весь период исследований было проведено 9525 измерений дозы внутреннего облучения, из них 7827 чел. (82 %) составляли мужчины и 1698 (18 %) – женщины. Средний возраст составил 43,2 года (43,4 – у мужчин и 42,2 года у женщин). Для 186 сотрудников имеются данные за период 10 и более лет; для 403 сотрудников результаты измерений имеются за 5 лет.

Изучение всего массива полученных данных свидетельствует, что в абсолютном большинстве случаев уровень дозы внутреннего облучения персонала не превышает 0,01 мЗв/год (4317 случаев); показатели 87 % всех измерений не превышают 0,055 мЗв/год (рис. 1).

В то же время в 11 % случаев были получены значения в диапазоне 0,1–0,2 мЗв/год, и лишь у 1,3 % сотрудников определены показатели дозы внутреннего облучения, превышающие 2 мЗв/год.

Анализ многолетней динамики данных за весь период исследований показал, что уровень дозы внутреннего облучения достигал наибольших значений в 2010 и 2011 г. – 0,029 (0,014–0,100) и 0,027 (0,013–0,100) мЗв/год соответственно. Дальнейшая динамика этого показателя зафиксирована на рис. 2.

В последующие годы показатели постепенно снижались и, начиная с 2015 г., изменялись не столь резко. Тем не менее, заметна определенная ежегодная вариабельность признака. В частности, в большинстве случаев изменение дозы внутреннего облучения за год является статистически значимым (относительно предыдущего года). Так, в 2010 г. наблюдалось резкое повышение медианного показателя дозы относительно 2009 г. на 270 % ($p < 0,05$). В последующий период отмечено постепенное снижение дозы, статистически значимое в 2012, 2014, 2015 и 2016 г. Однако в отдельные годы происходит отклонение от данной тенденции: в 2017 и 2021 г. отмечено возрастание показателя дозы на 3,5 и 4,3 % соответственно. Последующее уменьшение дозы в 2018 и 2022 гг. (на 2,5 и 4,3 % соответственно) было статистически значимым.

¹Закон РБ «О радиационной безопасности», 18 июня 2019 г. № 198-3 [Электронный ресурс]. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H11900198> (дата обращения: 18.12.2023).

²Закон РБ «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий», 6 января 2009 г. № 9-3 [Электронный ресурс]. Эталон-онлайн. Информационно-поисковая система. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=h10900009> (дата обращения: 18.12.2023).

³МВИ.МН 1958-2003. Методика выполнения измерений активности гаммаизлучающих радионуклидов в теле человека с помощью спектрометра излучения человека СКГ-АТ 1316: дата выдачи свидетельства об аттестации 29.08.2016. Номер свидетельства об аттестации 968/2016. Номер в реестре ФР.1.38.2016.24656 / УП «АТОМТЕХ» ОАО «МНИПИ».

Анализ показателей дозы внутреннего облучения в зависимости от профессиональной занятости сотрудников позволил выявить значительные различия у представителей отдельных специальностей. Количественные показатели профессиональной структуры обследованного персонала представлены в табл. 1.

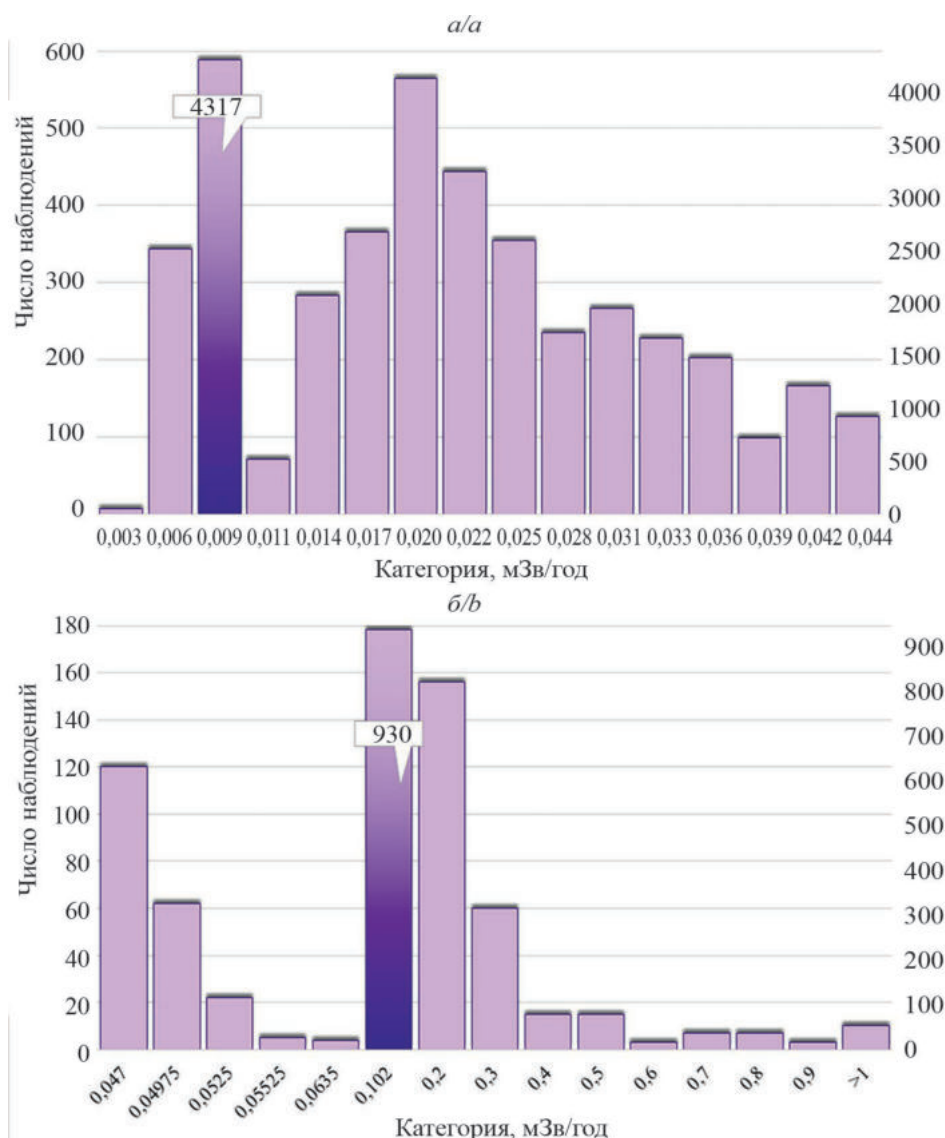


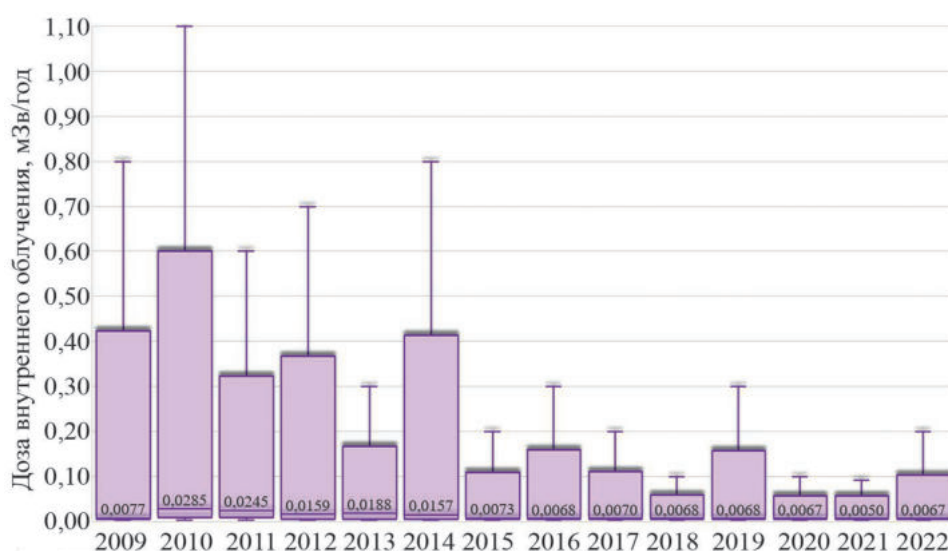
Рис. 1. Гистограмма распределения величин индивидуальных доз внутреннего облучения сотрудников ПГРЭЗ:
а) число наблюдений для диапазона доз от 0,00575 до 0,0085; б) от 0,00635 до 0,102

Fig. 1. Histogram of the distribution of individual doses of internal radiation of PSRER employees:
а) 0,00575–0,0085; б) 0,00635–0,102

Согласно данным табл. 1, наибольшую численность среди обследованных составляют работники отдела лесного хозяйства (проведено 3878 измерений) и водители (1334 измерения).

Полученные результаты статистического анализа различий дозы внутреннего облучения у представителей отдельных специальностей в порядке убывания представлены на рис. 3. Максимальные показатели медианы дозы внутреннего облучения определены у охотоведов, коневодов, пожарных и водителей, а наименьшие – у обследованных лиц, не являющихся сотрудниками заповедника, а также инженерно-исследовательского персонала.

Установлено, что медиана дозы внутреннего облучения у охотоведов статистически значимо ($p < 0,05$) превысила показатели представителей всех остальных профессий (в 1,4–3,9 раза), за исключением пожарных, у которых данный показатель также значимо ($p < 0,05$) превышает дозу остальных профессиональных групп (в 1,1–3,0 раза).



Примечание. Внутри столбцов подписаны значения медианы, верхушки и основания прямоугольников соответствуют квартилям (Q25 и Q75), «усы» отображают минимумы и максимумы.

Рис. 2. Многолетняя динамика дозы внутреннего облучения сотрудников ПГРЭЗ

Fig. 2. Long-term dynamics of internal exposure doses of employees of PSRER

Таблица 1

**Количество измерений показателей дозы внутреннего облучения
у представителей различных специальностей персонала ПГРЭЗ**

Table 1

Number of measurements of internal exposure dose indicators for representatives of various specialties of the PSRER personnel

Специальность	Количество	% от общего числа
Машинисты	1	0,01
Охотоведы	77	0,85
Коневоды	25	0,28
Пожарные	435	4,81
Водители	1334	14,72
Работники отдела лесного хозяйства	3878	42,79
Дезактиваторы	68	0,75
Зоотехники	24	0,26
Руководящие лица	260	2,87
Рабочие	805	8,88
Специалисты	909	10,03
Обслуживающий персонал	512	5,65
Лаборанты	122	1,35
Ветврачи	20	0,22
Дозиметристы	81	0,89
Лица, не являющиеся сотрудниками ПГРЭЗ	40	0,44
Инженеры	368	4,06
Механики	48	0,53
Сотрудники научного отдела	441	4,87

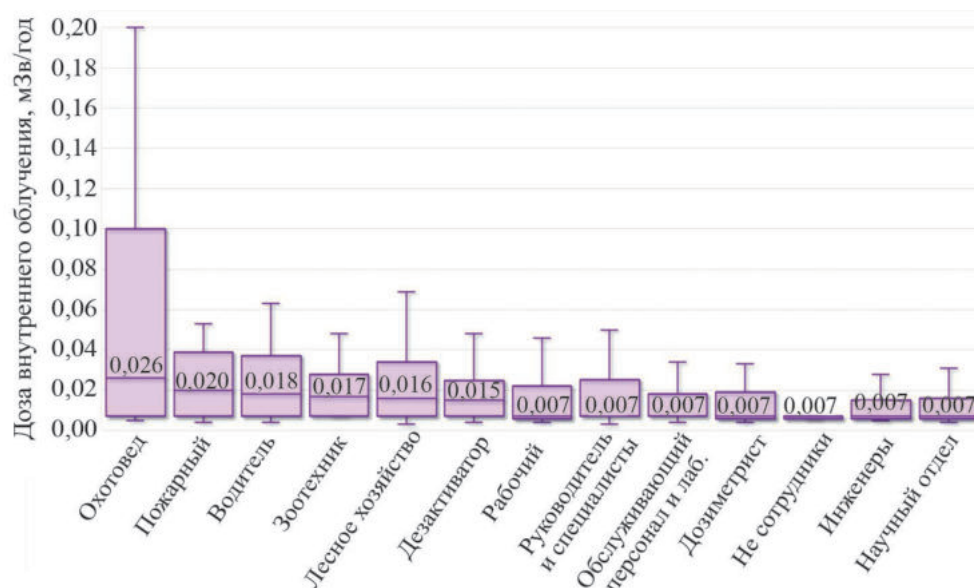


Рис. 3. Показатели дозы внутреннего облучения представителей различных специальностей ППРЭЗ

Fig. 3. Internal exposure dose rates for representatives of various specialties of PSRER

Следует отметить, что персонал заповедника можно поделить на 3 группы специальностей, между которыми имеются статистически значимые отличия. К *первой группе* с самыми высокими показателями дозы внутреннего облучения можно отнести охотоведов, пожарных, водителей, зоотехников, работников отдела лесного хозяйства и дезактиваторов. *Вторая группа* со средними уровнями дозы – это рабочие, руководители и специалисты, а также обслуживающий персонал и лаборанты. К *группе с наименьшими значениями дозы* относятся дозиметристы, инженеры, механики и научные сотрудники.

Известно, что в группах населения, потребляющих «природную» продукцию («дары» леса, дичь, рыба), ее вклад в поступление радионуклида в организм существенно вырос в отдаленные периоды после аварии и преобладает над другими путями поступления радионуклида в организм [6]. Очевидно, что главным отличием представителей первой выделенной профессиональной группы в определенной степени является возможные особенности рациона питания [7], либо влияние (например, у пожарных) ингаляционного пути поступления радионуклидов на формирование эффективной дозы облучения, хотя, по данным других исследований [8], вклад ингаляционной компоненты является незначительным⁴.

Изучение влияния гендерного фактора на уровень дозы внутреннего облучения показало значимое ($p < 0,05$) превышение данного показателя у мужчин, по сравнению с женщинами, в 2 раза. Возможно, данные отличия обусловлены в определенной степени профессиональной составляющей. Если доля работников отдела лесного хозяйства, инженеров и научных сотрудников примерно одинакова среди мужчин и женщин, то доля пожарных, водителей, дезактиваторов существенно выше у мужчин (женщины также не занимают должность охотоведа). В то же время доля зоотехников, лаборантов, обслуживающего персонала, специалистов и руководящих работников среди женщин выше.

Очевидно, что значимым фактором, определяющим уровень дозы внутреннего облучения, является число жителей населенного пункта (так называемый демографический критерий) [9]. В этой связи проводилось сопоставление показателей дозы внутреннего облучения у сотрудников заповедника, проживающих в различных населенных пунктах (табл. 2).

Как следует из табл. 2, наиболее высокие медианные значения дозы внутреннего облучения отмечены у жителей г. Наровля⁵. Помимо того, что город находится в относительной близости от лесных насаждений и р. Припять, обуславливающие высокие показатели [10], среди сотрудников заповедника большинство жителей Наровли работают в отделе лесного хозяйства (51 чел.).

⁴МВИ.МН 1958-2003. Методика выполнения измерений активности гаммаизлучающих радионуклидов в теле человека с помощью спектрометра излучения человека СКГ-АТ 1316: дата выдачи свидетельства об аттестации 29.08.2016. Номер свидетельства об аттестации 968/2016. Номер в реестре ФР.1.38.2016.24656 / УП «АТОМТЕХ» ОАО «МНИПИ».

⁵Там же.

Близость леса к д. Березовка, Борисовщина и Новоселки также может служить объяснением относительно высоких уровней дозы внутреннего облучения в данных населенных пунктах. В непосредственной близости от г. Хойники находится д. Малишев, которая в 2009 г. была включена в состав города. Тем не менее, определена статистически значимая ($p < 0,05$) разница в уровнях дозы внутреннего облучения сотрудников из деревни и города. В данном случае однозначным объяснением может быть профессиональный состав сотрудников д. Малишев (19 чел. – водители и 17 сотрудников – пожарные).

Таблица 2

Различия в показателях дозы внутреннего облучения у персонала ПГРЭЗ,
проживающих в различных населенных пунктах

Table 2

Differences in internal exposure dose rates among PSRER personnel living in different populated areas

Населенный пункт	Район	Плотность загрязнения почв ^{137}Cs , Ки/км ²	Численность населения, человек	Число измерений	Внутренняя доза, мЗв/год		
					Квартиль Q25	Медиана	Квартиль Q75
Наровля	Наровлянский	5–15	8374	68	0,100	0,300	0,500
Березовка	Калинковичский	1–5	169	51	0,042	0,100	0,100
Малишев	Хойникский	5–15	436	36	0,069	0,100	0,150
Борисовщина	Хойникский	5–15	275	45	0,021	0,046	0,100
Новоселки	Хойникский	5–15	38	29	0,028	0,042	0,100
Храпков	Хойникский	5–15	376	74	0,018	0,040	0,100
Судково	Хойникский	5–15	577	78	0,015	0,028	0,100
Козелужье	Хойникский	1–5	487	91	0,008	0,023	0,035
Великий Бор	Хойникский	1–5	1052	91	0,012	0,022	0,032
Глинище	Хойникский	1–5	513	50	0,007	0,022	0,040
Стреличево	Хойникский	15–40	749	94	0,007	0,014	0,025
Велетин	Хойникский	5–15	376	20	0,006	0,011	0,023
Хойники	Хойникский	5–15	13248	7747	0,007	0,008	0,027
Езапов	Хойникский	5–15	166	30	0,006	0,007	0,017
Дворище	Хойникский	5–15	258	88	0,007	0,007	0,100
Брагин	Брагинский	5–15	4546	116	0,006	0,007	0,020
Бурки – Ковали	Брагинский	5–15	474	42	0,006	0,007	0,007
Минск	–	–	1 995 471	210	0,006	0,007	0,007
Гомель	–	1–5	503 984	71	0,006	0,006	0,015

Предсказуемо наименьшие уровни дозы внутреннего облучения характерны для иногородних работников заповедника из Минска и Гомеля.

Исследование возрастных зависимостей формирования дозы позволило определить 5 возрастных групп, между которыми существуют статистически значимые различия данного показателя (рис. 4).

Наибольшие уровни дозы внутреннего облучения определены для группы 35–46 лет, а минимальные у самых молодых (18–26 лет). Таким образом, лица среднего возраста характеризуются наибольшей дозовой нагрузкой.

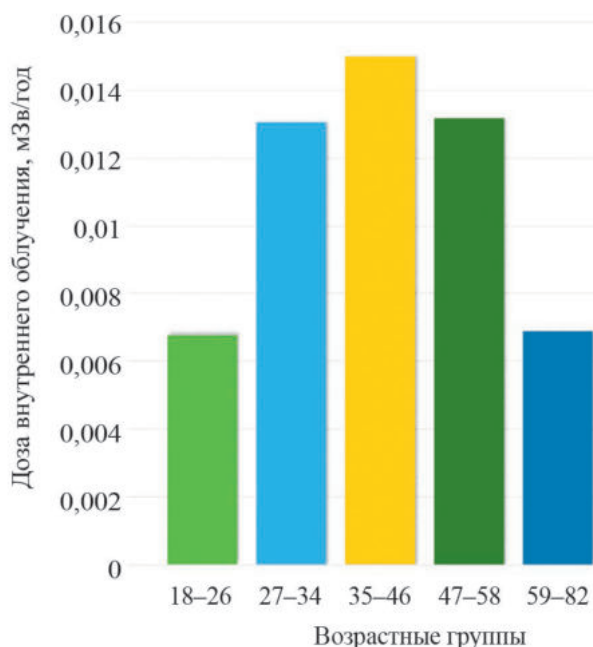


Рис. 4. Сопоставление показателей дозы внутреннего облучения в различных возрастных группах за 2021–2022 гг.

Fig. 4. Comparison of internal exposure dose indicators in different age groups of PSRER employees for 2021–2022

Заключение

В 87 % измерений показатели дозы внутреннего облучения сотрудников ППРЭС не превышают уровня 0,055 мЗв/год.

За многолетний период исследований уровень дозы внутреннего облучения был наибольшим в 2010 и 2011 гг. соответственно 0,029 и 0,027 мЗв/год.

Максимальные медианные значения дозы внутреннего облучения выявлены у охотоведов (в 1,4–3,9 раза выше показателей представителей остальных профессий, $p < 0,05$). Наименьшие значения определены у инженерно-исследовательского персонала (менее 0,04 мЗв/год).

Максимальные показатели дозы внутреннего облучения отмечены у сотрудников заповедника, проживающих в г. Наровля, а самые низкие у работающих вахтовым методом и постоянно проживающих на территориях, отдаленных от зоны отселения.

Определен значимо более высокий ($p < 0,05$) уровень дозы у мужчин, по сравнению с женщинами, в 2 раза.

Среди представителей различных возрастных групп самыми высокими показателями дозы внутреннего облучения характеризуются работники 35–46 лет (0,015 мЗв/год), а наименьшими – молодые люди 18–26 лет (0,007 мЗв/год).

Библиографические ссылки

1. Власова НГ, Висенберг ЮВ, Евтушкова ГН, Дрозд ЕА. Оценка доз облучения населения в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии. *Проблемы здоровья и экологии*. 2014;4(42):129–134.
2. Ракитский ВН, Кузмичев МК, Клепиков ОВ. Сравнительная оценка средних доз облучения населения Иркутской и Воронежской областей по данным ЕСКИД. *Радиационная гигиена*. 2021;2(14):72–78. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-2-72-78>.
3. Эвентова ЛН, Матарас АН, Батян АН. Дозы облучения населения Беларуси вследствие аварии на Чернобыльской атомной электростанции на 2021–2025 гг. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;4:70–78. DOI: <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-70-78>.
4. Братилова АА, Базюкин АБ, Громов АВ. Обзор средних текущих и накопленных эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения. *Технологии гражданской безопасности*. 2024;21(S1):53–60.
5. Власова НГ. Оценка средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территориях, загрязненных радионуклидами в результате аварии на ЧАЭС. *Радиационная гигиена*. 2012;5(2):9–13.
6. Балонов МИ, Брук ГЯ, Звонова ИА. Методология реконструкции дозы внутреннего облучения населения России вследствие Чернобыльской аварии. *Радиационная гигиена*. 2008;1(3):12–20.

7. Панов АВ, Комарова ЛН, Ляпунова ЕР. Особенности формирования дозовых нагрузок на население наиболее пострадавших после Чернобыльской аварии районов России. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2023;3:73–84. <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.06>.
8. Кляус ВВ, Жукова ОМ, Гусейнова ДИ. 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. DOI: <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-57-67>
9. Дроздов ДН, Аверин ВС. Использование методов факторного анализа для выявления обобщающих характеристик, позволяющих оценить вариацию средней годовой дозы внутреннего облучения. *Проблемы здоровья и экологии*. 2008;(2):10–14. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2008-5-2-2>.
10. Власова НГ. Сравнительный анализ средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь по данным Каталогов доз-2015 и 2009. *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Серия Естественные науки*. 2017;1(102):20–24.

References

1. Vlasova NG, Visenberg YuV, Evtushkova GN, Drozd EA. *Otsenka doz oblucheniya naseleniya v otдалennom periode posle chernobyl'skoy avari* [Assessment of radiation doses to the population in the long-term period after the Chernobyl accident]. *Health and Ecology Issues*. 2014;4(42):129–134. Russian.
2. Rakitsky VN, Kuzmichev MK, Klepikov OV, Kurenkova GV. *Sravnitel'naya otsenka srednikh doz oblucheniya naseleniya Irkutskoi i Voronezhskoi oblastei po dannym ESKID* [Comparative evaluation of average doses of radiations of population of Irkutsk and Voronezh regions according to «Unified state system of control of individual doses»]. *Radiation Hygiene*. 2021;2(14):72–78. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-2-72-78>. Russian.
3. Eventova LN, Mataras AN, Batyan AN. *Dozy oblucheniya naseleniya Belarusi vsledstvie avarii na Chernobyl'skoi atomnoi elektrostantsii na 2021–2025 gg.* [Exposure doses to the population of Belarus from the Chernobyl accident in 2021–2025]. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;4:70–78. DOI: <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-70-78>. Russian.
4. Bratilova AA, Bazyukin AB, Gromov AV. *Obzor srednikh tekushchikh i nakoplenykh effektivnykh doz oblucheniya zhitelei naselennykh punktov Rossiiskoi Federatsii, otnesennykh k zonam radioaktivnogo zagryazneniya* [Overview of average current and accumulated effective radiation doses of the Russian federation settlements residents classified as zones of radioactive contamination]. *Civil security technologies*. 2017;10(4):73–78. Russian.
5. Vlasova NG. *Otsenka srednikh godovykh effektivnykh doz oblucheniya zhitelei naselennykh punktov, raspolozhennykh na territoriyakh, zagryaznennykh radionuklidami v rezul'tate avarii na ChAES* [Assessment of the average annual effective doses for the inhabitants of the settlements located in the territories contaminated due to the Chernobyl accident]. *Radiation hygiene*. 2012;5(2):9–13. Russian.
6. Balonov MI, Bruk GYA, Zvonova IA. *Metodologiya rekonstruktsii dozy vnutrennego oblucheniya naseleniya Rossii vsledstvie Chernobyl'skoi avarii* [Methodology of internal dose reconstruction for the Russian population after the Chernobyl accident]. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(3):12–20. Russian.
7. Panov AV, Komarova LN, Lyapunova ER, Mel'nikova AA. *Osobennosti formirovaniya dozovykh nagruzok na naselenie naibolee postradavshikh posle Chernobyl'skoi avarii raionov Rossii* [Peculiarities of the exposure dose formation on the population in the most affected regions of Russia after the Chernobyl NPP accident. News of higher educational institutions]. *Nuclear energy*. 2023;3:73–84. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.06>. Russian.
8. Kliaus VV, Zhukova OM, Huseinava DI. *Metod otsenki doz oblucheniya personala i naseleniya v rezul'tate ingalyatsionnogo postupleniya radionuklidov pri pozharakh na territoriyakh s vysokim urovnem radioaktivnogo zagryazneniya* [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. DOI: <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-57-67>. Russian.
9. Drozdou DN, Avenir VS. *Ispol'zovanie metodov faktornogo analiza dlya vyyavleniya obobshchayushchikh kharakteristik, pozvolyayushchikh otsenit' variatsiyu srednei godovoi dozy vnutrennego oblucheniya* [Use of methods of the factorial analysis for revealing the generalizing characteristics, allowing to estimate the variation of the average annual dose of the internal irradiation]. *Health and Ecology Issues*. 2008;(2):10–14. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2008-5-2-2>. Russian.
10. Vlasova NG. *Sravnitel'nyi analiz srednikh godovykh effektivnykh doz oblucheniya zhitelei naselennykh punktov Respubliki Belarus' po dannym Katalogov doz-2015 i 2009* [Comparative analysis of average annual effective radiation doses to residents of populated areas of the Republic of Belarus according to the Dose Catalogues-2015 and 2009]. *Proceedings of the Francisk Skorina Gmel State University. Series: Natural Sciences*. 2017;1(102):20–24. Russian.

УДК 539.1.047:631.95:574.46

ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕХОДА РАДИОНУКЛИДОВ В БИОМАССУ МИСКАНТУСА ГИГАНТСКОГО НА ЗЕМЛЯХ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ ПОЛЕССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

М. В. КУДИН¹⁾, Е. Б. ЕВСЕЕВ¹⁾, Д. К. ГАРБАРУК¹⁾, А. Н. ВОРОНЕЦКАЯ¹⁾, А. В. ДРАГУН²⁾

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

²⁾Гомелаб Технолоджи,
ул. Хозяйственная, 5, 246144, г. Гомель, Беларусь

Изучается новая для Беларуси культура мискантус гигантус, интродуцированная в условиях Белорусского Полесья, описаны ее биологические и экологические особенности. Предложено использование исследуемой культуры на энергетические цели. Предполагается, что выращивание в Беларуси растений на энергетические цели наиболее перспективно в природно-климатических условиях Гомельской обл. Культивирование мискантуса способствует решению ряда значимых экологических вопросов, обеспечивая получение устойчивого урожая качественной растениеводческой продукции, что повышает эффективность низкоплодородных земель, улучшает гумусное состояние и стабилизирует фонд подвижных форм зольных элементов почвы, тем самым препятствуя нарастающему истощению ее плодородия и деградации. Дана характеристика климатических условий произрастания на протяжении опыта с 2020 по 2023 гг. Описывается экспериментальная деятельность по выращиванию мискантуса гигантуса сорта «Дружба-Автюки» на территории зоны отчуждения Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. Определены параметры накопления Cs^{137} и Sr^{90} в вегетативной массе растения. Рассчитаны предельно допустимые плотности загрязнения почв при выращивании исследуемого растения на различные технические цели. При выращивании мискантуса гигантского сорта «Дружба-Автюки» на дерново-подзолистых песчаных и дерново-подзолистых глееватых почвах для производства древесного технического сырья, топлива древесного и прочей непищевой продукции лесного хозяйства возможно без ограничений по плотности загрязнения Cs^{137} . Однако получение нормативно чистой биомассы исследуемой культуры на дерново-подзолистых временно избыточно увлажненных почвах налагает ограничения по плотности загрязнения почвы Cs^{137} : 27,85 Ки/км² – для прочей непищевой продукции лесного хозяйства; 22,3 Ки/км² – для древесного технического сырья; 11,1 Ки/км² – для топлива древесного. Предполагается перспективность использования растительного сырья мискантуса гигантского, выращенного на радиоактивно загрязненных землях в технологических целях (для получения целлюлозы, биодизеля, биогаза), при условии выполнения дополнительных исследований и проработки технологических операций на реальных производственных объектах.

Образец цитирования:

Кудин МВ, Евсеев ЕБ, Гарбарук ДК, Воронцовская АН, Драгун АВ. Параметры перехода радионуклидов в биомассу мискантуса гигантского на землях зоны отчуждения Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;4:44–54.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-44-54>

For citation:

Kudin MV, Evseev EB, Garbaruk DK, Voronetskaia AN, Dragun AV. Parameters of the transition of radionuclides into the biomass of miscanthus giganteus on the lands of the exclusion zone of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;4:44–54. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-44-54>

Авторы:

Максим Владимирович Кудин – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заместитель директора по научной работе.

Евгений Борисович Евсеев – кандидат сельскохозяйственных наук; заведующий отделом радиационно-экологического мониторинга.

Дмитрий Константинович Гарбарук – заведующий отделом экологии растительных комплексов.

Алеся Николаевна Воронцовская – младший научный сотрудник отдела экологии растительных комплексов.

Александр Викторович Драгун – директор, владелец сорта «Дружба-Автюки».

Authors:

Maxim V. Kudin, PhD (agriculture), docent; deputy director for research.

max.kudin@mail.ru

Evgeniy B. Evseev, PhD (agriculture); head of the department of radiation and environmental monitoring.

evsey89@mail.ru

Dmitry K. Garbaruk, head of the department of ecology of plant complexes.

dima.garbaruk.77@mail.ru

Alesya N. Voronetskaia, junior researcher at the department of ecology of plant complexes.

voronetskaya2015@mail.ru

Alexander V. Dragun, director; owner of the "Druzhba-Avtyuki" variety.

gk.gomelab@yandex.ru

Ключевые слова: мискантус гигантский; Cs¹³⁷; Sr⁹⁰; параметры перехода; предельно допустимые плотности загрязнения почвы; технологические цели.

PARAMETERS OF THE TRANSITION OF RADIONUCLIDES INTO THE BIOMASS OF MISCANTHUS GIGANTUS ON THE LANDS OF THE EXCLUSION ZONE OF THE POLESIE STATE RADIATION-ECOLOGICAL RESERVE

M. V. KUDIN^a, E. B. EVSEEV^a, D. K. GARBARUK^a, A. N. VORONETSKAYA^a, A. V. DRAGUN^b

^aPolesie State Radiation-Ecological Reserve,
7 Tserashkova Street, Khoyniki 247618, Gomel region, Belarus

^bGomelab Technologies LLC,
5 Khazjajstvennaja Street, Gomel 246144, Belarus
Corresponding author: E. B. Evseev (evsey89@mail.ru)

The article describes a new culture for Belarus, *Miscanthus giganteus*, introduced in the conditions of Belarusian Polesie, and also describes its biological and environmental features. It is proposed to use the studied crop for energy purposes. It is assumed that growing plants for energy purposes in Belarus is most promising in the natural and climatic conditions of the Gomel region. The cultivation of *Miscanthus* contributes to solving a number of significant environmental issues. First of all, it ensures obtaining a sustainable harvest of high-quality crop products, which increases the efficiency of using low-fertile lands. Secondly, it improves the humus state and stabilizes the pool of mobile forms of ash elements in the soil, thereby preventing the increasing depletion of its fertility and degradation. The characteristics of the climatic conditions of growth during the experiment from 2020 to 2023 are given. Experimental activities for growing *Miscanthus giganteus* variety «Druzhba-Avtyuki» in the exclusion zone of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve are described. The parameters of accumulation of Cs¹³⁷ and Sr⁹⁰ in the vegetative mass of the plant were determined. The maximum permissible densities of soil contamination were calculated when growing the plant under study for various technical purposes. When growing *Miscanthus* of the giant variety «Druzhba-Avtyuki» on sod-podzolic sandy and sod-podzolic gleyic soils for the production of wood technical raw materials, wood fuel and other non-food forestry products, it is possible without restrictions on the density of contamination with Cs¹³⁷. At the same time, obtaining normatively pure biomass of the studied crop on soddy-podzolic soils that are temporarily excessively moistened imposes restrictions on the density of soil contamination with cesium-137: 27,85 Ci/km² – for other non-food forestry products; 22,3 Ci/km² – for wood technical raw materials; 11,1 Ci/km² – for wood fuel. It is suggested that there are prospects for using plant raw materials of giant *Miscanthus*, grown on radioactively contaminated lands, for technological purposes (to produce cellulose, biodiesel, biogas), subject to additional research and development of technological operations at real production facilities.

Keywords: giant *Miscanthus*; Cs¹³⁷; Sr⁹⁰; transition parameters; maximum permissible densities of soil pollution; technological goals.

Введение

Исторически сложившаяся проблема загрязнения большого количества земель Республики Беларусь в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС до сих пор остается актуальной и вызывает необходимость исследования закономерностей депонирования радионуклидов в новых культурах, интродуцированных в отдаленный период после аварии. Авария оценивается как крупнейшая в своем роде за всю историю атомной энергетики по предполагаемому количеству погибших и пострадавших от ее последствий людей и по экономическому ущербу.

На 1 января 2020 г. площадь территории радиоактивного загрязнения республики цезием-137 вследствие его радиоактивного распада уменьшилась в 1,7 раза, стронцием-90 – почти в 1,9 раза и составляет соответственно 13,4 и 5,3 % общей площади республики [1].

Одним из наиболее тяжелых экологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС явилось радиоактивное загрязнение сельскохозяйственных земель. С целью предотвращения производства продукции с высоким содержанием радионуклидов 265 тыс. га земель было выведено из хозяйственного оборота и отнесено к радиационно опасным [2].

Приоритеты государственной политики на 2021–2025 гг. – дальнейшее снижение риска неблагоприятных последствий для здоровья граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, проведение на достигнутом уровне защитных мероприятий, осуществление радиационного мониторинга и контроля радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды, содействие восстановлению и ускоренному устойчивому социально-экономическому развитию пострадавших регионов при

безусловном выполнении требований радиационной безопасности, научное и информационное сопровождение.

Для выполнения заданий государственной программы требуется сокращение использования местных видов топлива для снижения дозовых нагрузок населения, проживающих на загрязненных радионуклидами землях. Предлагаемые варианты их замены заключаются в дальнейшей газификации и электрификации. Акцентируются местные экологически чистые источники энергии. В данной ситуации перспективным источником газа и электроэнергии выступает биогаз.

Биогазовые технологии в настоящее время являются одним из перспективных направлений возобновляемой энергетики, обеспечивая решение как энергетических, так и экологических задач. Биогазовые технологии уже получили широкое распространение в Европе, США, Китае, Бразилии и некоторых других странах. По данным источника [3], Европейской Биогазовой Ассоциации на начало 2016 г. в Европейском союзе насчитывалось 17376 биогазовых установок, было подсчитано, что за год они вырабатывают такое количество биогаза, за счет которого можно выработать 60,6 ТВт·ч электроэнергии, достаточного для обеспечения электроэнергией 14 млн домашних хозяйств. По данным Департамента по энергоэффективности государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь, в стране действует 20 биогазовых установок общей мощностью 27,9 МВт. Самая крупная установка на 4,8 МВт расположена в Могилевской обл.

В нашей республике нет больших запасов ископаемых энергетических ресурсов, однако достаточно широко могут использоваться энергетические растения. По своей сути они являются возобновляемыми ресурсами, так как периодически восстанавливаются и при рациональном использовании не наносят вреда окружающей среде. Помимо этого, энергетические растения могут использоваться в качестве пищевой энергии (кормов). В связи с этим развитие альтернативной энергетики имеет большое значение, а изучение биологических особенностей и способов выращивания энергетических растений является актуальным направлением исследований. Производство биоэнергии из биологической массы, выращенной на собственной земле, – перспективное направление для сельскохозяйственного производства [4].

Выращивание в Беларуси растений на энергетические цели наиболее важно в природно-климатических условиях Гомельской обл. Климат Белорусского Полесья (южная агроклиматическая область) теплый, неустойчиво-влажный, отличается большими перепадами температур и частыми засухами [5].

Наиболее перспективным, в этом отношении, растением является Мискантус (*Miscanthus* spp.), обладающий достаточно высоким адаптивным потенциалом. Его надземная целлюлозосодержащая биомасса относится к нетрадиционным возобновляемым источникам сырья и энергии, получение которых не требует значительных капитальных вложений.

В результате проведенного анализа литературных источников было выявлено большое количество преимуществ мискантуса.

1. Способность производственных плантаций произрастать на одном месте более 20 лет без существенного снижения продуктивности [6].

2. Свойство длительное время произрастать на низкопродуктивных землях [6].

3. Качественное сырье при производстве целлюлозы, бумаги, этанола, упаковочных материалов и других ценных продуктов.

4. Применение мискантуса в качестве биоразлагаемого сорбента для борьбы с загрязнением территорий, в частности тяжелыми металлами, ликвидации разливов нефти и т. д. [7–9].

Естественное географическое распространение рода *Miscanthus* приурочено к умеренной и субтропической зонам Юго-Восточной Азии, простираясь на запад до Центральной Индии и на восток до Полинезии; несколько видов обнаружены в Африке, а также на Дальнем Востоке в бореальной зоне [14]. Эти растения мискантуса в целом хорошо приспосабливаются к различным местам обитания, способны произрастать на разных высотах, что говорит о значительном адаптивном потенциале рода. Однако триплоид *M. giganteus* является наиболее распространенной формой для выращивания в южных регионах [15]. Он имеет фотосинтез C_4 -типа с высоким уровнем эффективности использования воды, света и элементов питания, при этом, в отличие от других видов растений C_4 -типа, некоторые виды мискантуса способны произрастать в относительно холодном климате [16]. Повышенная холодоустойчивость отдельных видов мискантуса делает перспективным кандидатом для возделывания в континентальных регионах России, в том числе в Сибири и регионах Поволжья [12;13].

В работах российских авторов [10–12; 17–20] подтверждается перспективность использования мискантуса, прогнозируются области культивирования на территории Российской Федерации, обосновывается настоятельная необходимость совершенствования технологий эффективной переработки этого целлюлозосодержащего растительного сырья, получаемого в специфических региональных условиях, описывается формирование и поддержание генофонда мискантуса в местных условиях [21].

Согласно исследованиям Л. А. Лосевой, по объемному содержанию зеленой массы исследованных растений, наиболее перспективными для получения зеленой массы в почвенно-экологических условиях восточной части нашей республики является мискантус гигантский [4].

Продуктивность биомассы этой культуры на малопродуктивных землях сильно варьирует и зависит от состояния используемых почв, применения удобрений и вида растений. Потенциальная продуктивность мискантуса при благоприятных факторах внешней среды может достигать 25 т сухой массы с 1 га, реальная же зависит от величины прихода фотосинтетической активной радиации (ФАР) и эффективности ее использования, почвенно-гидротермических условий выращивания, продолжительности вегетационного периода и вида растения [22]. Влияние климатических условий региона на урожайность мискантуса также показано в работах ряда отечественных и зарубежных авторов [13].

Исследования секвестирования углерода многолетними энергетическими культурами показали их способность связывать углерод (от 0,25 до 4 т/га в год почвенного углерода) и улучшать при этом агрофизические свойства почвы, увеличивать микробную биомассу и ее активность [23].

Одним из достоинств мискантуса является обеспечение его посадками положительного энергетического баланса и профицитного баланса гумуса. По данным В. А. Зинченко и М. Яшина (2011), урожай надземной биомассы этой культуры в 20 т/га может обеспечить столько же энергии, сколько производится из 12 т угля. При выращивании мискантуса уже на 5-й год в почве плантаций наблюдается увеличение (на 0,1–0,2 %) содержания гумуса [10]. Показано, что при его выращивании в течение 10 лет на почвах легкого гранулометрического состава содержание гумуса в почве возросло на 0,3–0,4 %, несмотря на интенсивное использование растениями почвенного мобильного азота, генерируемого соответствующими минерализационными процессами [11].

Исследования, проведенные за рубежом в посадках мискантуса, свидетельствуют, что запасы углерода в почве под этой культурой увеличиваются на 2 т/га в год [24]. В период формирования многолетних посадок мискантуса (4 года) в условиях Западной Сибири была проведена оценка компонентов баланса углерода, которая показала наличие объективных предпосылок для закрепления углерода атмосферы в устойчивых фракциях почвенного органического вещества [25].

С. Ю. Капустянчик с соавторами (2020) определили, что ежегодный вынос мискантусом элементов питания из почвенных запасов при средней урожайности 12 т/га составляет азота – 17–20 кг/га, фосфора – 11–17, калия – 35–40, магния – 2–3 кг/га. По сравнению с другими урожайными культурами, такие масштабы отчуждения питательных элементов из почвы представляются невысокими. Низкую потребность мискантуса в почвенных запасах элементов питания отмечали и другие авторы [7; 22].

По данным некоторых исследователей [26; 27], применение удобрений под мискантус целесообразно только в первые 1–2 года формирования плантации на почвах с очень низким содержанием NPK. Слабая отзывчивость этой культуры на внесение удобрений во многом связана с ее способностью к эффективной реутилизации питательных элементов.

Определенную степень опасности может вызывать предположение об инвазивности исследуемой культуры. Однако известно, что она свойственна растениям, размножающимся семенами. В этой связи, по мнению ряда авторов, мискантус не представляет инвазивной угрозы для сельскохозяйственных угодий [16].

Таким образом, исследования, проведенные в различных странах мира в разных почвенно-климатических условиях, установили положительные средообразующие возможности мискантуса, его очевидный фитомелиоративный и адаптивный потенциал. Выявлена способность растений рода *Miscanthus* поддерживать высокий уровень фотосинтеза C_4 -типа при низких температурах [28–30], показаны невысокие потребности в питательных веществах, способность связывать большое количество углерода, хорошая эффективность использования имеющейся влаги, высокая продукция биомассы [22; 28], а также повышенная устойчивость к болезням и вредителям [10].

На основании проведенного анализа большого числа литературных источников выдвигается гипотеза о перспективе культивирования мискантуса на энергетические цели на землях, загрязненных радионуклидами, выведенных из оборота. На основании инвентаризации выведенных из оборота земель установлено, что в настоящее время в Гомельской обл. числятся выведенными из хозяйственного оборота около 202 тыс. га, в Могилевской – около 44 тыс. га.

Материалы и методы исследования

В 2019 г. государственным природоохранным научно-исследовательским учреждением «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник» (далее – заповедник) была проведена закладка мелкоделяночного полевого эксперимента по оценке накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr мискантусом гигантским (сорт «Дружба-Автюки») на радиоактивно загрязненных землях с разной плотностью загрязнения почвы данными радионуклидами.

Стационарный полевой опыт по изучению параметров перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr из дерново-подзолистых почв разной степени гидроморфизма в биомассу мискантуса гигантского проводился в течение 4 лет (2020–2023 гг.) на землях белорусского сектора зоны отчуждения аварии на Чернобыльской АЭС согласно методике Доспехова [31]. Климатические условия вегетации мискантуса оценивались по общепринятой методике Г. Т. Селянинова [32]. Для постановки эксперимента было подобрано 3 участка с ненарушенной почвой и разной плотностью загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr . Объекты исследований располагались с севера на юг заповедника:

1. Бывший населенный пункт (далее – б. н. п.) Бабчин (северная граница заповедника) – 42 км до реактора.

Почвы: дерново-подзолистые глееватые иллювиально-гумусные супесчаные на рыхлых песках.

2. Б. н. п. Дроньки (центр заповедника) – 30 км до реактора.

Почвы: дерново-подзолистые временно избыточно увлажненные иллювиально-гумусные песчаные на связных песках.

3. Б. н. п. Масаны (южная граница заповедника) – 12 км до реактора.

Почвы: дерново-подзолистые слабодефлированные песчаные на мощных рыхлых песках.

На каждом участке опыт закладывался в трехкратной повторности с размещением площадок учетной площадью 1,4 м² на расстоянии не менее 10 см между ними. Перед посадкой на каждой площадке измерялась мощность дозы гамма-излучения (далее – МД) на высоте 1 м от поверхности почвы в 3-кратной повторности дозиметром-радиометром МКС–АТ6130 (Атомтех, Беларусь). Отбор проб почвы производили стандартным пробоотборником диаметром 4 см на глубину 20 см с дерниной. После выполнения радиологических измерений почву вскапывали и на каждой площадке высаживали по 20 растений. Данные работы были выполнены 3–4 апреля 2020 г. В течение вегетационного сезона выполнялись работы по прополке и поливу растений мискантуса. Осенью отбирались сопряженные пробы почвы и биологического материала мискантуса. Пробы почвы и биологического материала подготавливали в соответствии с общепринятыми методиками. Удельную активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах определяли в лаборатории спектрометрии и радиохимии заповедника на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре МКС–АТ1315 (Атомтех, Беларусь). Ошибка измерений при этом не превышала 30 %.

С целью установления изменчивости (размаха варьирования) плотности загрязнения почвы и удельной активности в растительной массе были определены коэффициенты вариации К. Пирсона (V):

$$CV = \frac{S_x}{\bar{x}} \cdot 100 \%,$$

где S_x – среднее квадратическое отклонение для выборки;

$\bar{x}$ – средняя арифметическая из суммы частных или групповых средних.

Для статистической обработки данных использовалась программа пакет *Microsoft Office Excel*.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно источнику [33], климатические условия оказывают существенное влияние на накопление радионуклидов травами. Средняя многолетняя сумма осадков в условиях восточного Полесья составляет 650 мм, а за теплый период выпадает 300–400 мм осадков. В самые засушливые годы их количество может уменьшаться до 150–300 мм. Коэффициент увлажнения за теплый период часто снижается ниже 0,8, а испаряемость превышает количество осадков на 70–90 мм.

Вегетационный период Полесья наиболее длинный в пределах республики и составляет 192–205 дней, а период температур выше 10 °С – 151–160 дней. Вегетационный период характеризуется повышенными температурами воздуха и частым недостатком осадков. В этих условиях, неоднократно в течение вегетационного периода, влажность пахотного слоя почвы снижается до мертвых запасов (2–3 %). Термические условия и режим увлажнения предъявляют повышенные требования к возделываемым культурам. Они должны иметь высокую пластичность и устойчивость к засушливым условиям.

Для объективной оценки тепла и влагообеспеченности следует использовать интегральные показатели, которые, кроме температуры воздуха и атмосферных осадков, учитывали бы и другие ресурсы тепла и влаги. Такими показателями могут служить испаряемость, комплексно характеризующая теплоэнергетические ресурсы климата, и коэффициент природного увлажнения территории Ку. Значения испаряемости определяли по модифицированной Н. В. Данильченко формуле Н. Н. Иванова по среднедекадным значениям температур, относительной влажности воздуха и скорости ветра. Климатические условия анализируемого периода характеризовались следующими среднегодовыми параметрами коэффициента увлажнения: 2020 г. – 0,91; 2021 г. – 0,75; 2022 г. – 0,87; 2023 г. – 0,75.

На территории Беларуси при значениях ГТК (Селянинова) от 0,2 до 0,4 условия вегетационного периода характеризуются как сухие, от 0,4 до 0,7 – очень засушливые, от 0,7 до 1,0 – засушливые, от 1,0 до 1,3 – слабозасушливые, 1,3–1,6 – оптимальные и > 1,6 – влажные [33]. Данные показатели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Климатические показатели за период исследований (по данным научно-исследовательской станции «Масаны»)

Table 1

Climatic indicators for the research period (according to data from the Masany research station)

Год	Количество осадков, мм		Коэффициент увлажнения по Иванову		ГТК
	V–IX	год	V–IX	год	годовые значения
2020	385,7	622,1	0,95	0,91	1,36
2021	295,0	519,1	0,81	0,75	0,94
2022*	356,7	697,6	0,98	0,87	1,41
2023*	171,1	433,5	0,33	0,75	0,88

Примечание. *По данным метеостанции «Брагин».

Исходя из данных, приведенных в табл. 1, можно сделать следующие выводы: 2020 и 2022 гг. характеризуются оптимальными климатическими условиями, а 2021 и 2023 гг. выдались засушливыми в соответствии с принятой градацией. Однако не выявлено статистически значимого влияния погодных условий на параметры перехода радионуклидов из почвы в растения мискантуса.

В результате проведенного опыта были определены и рассчитаны значения удельной активности (Ау) биомассы, плотности загрязнения почвы (ПЗ) и коэффициенты перехода (КП) ^{137}Cs и ^{90}Sr (табл. 2).

Таблица 2

Параметры перехода радионуклидов в растения мискантуса

Table 2

Parameters of the transfer of radionuclides into miscanthus plants

Место положения делянок	Период	ПЗ почвы, Ки/км ²	Ау в биомассе мискантуса, Бк/кг	КП, Бк/кг: кБк/м ²	ПЗ почвы, Ки/км ²	Ау в биомассе мискантуса, Бк/кг	КП, Бк/кг: кБк/м ²
Б. н. п. Бабчин	Для ^{137}Cs				Для ^{90}Sr		
	2020	10,6	78,0	0,21	1,1	348,3	8,96
	2021	12,6	129,0	0,27	1,6	228,3	5,09
	2022	11,3	37,7	0,09	0,7	173,7	6,74
	2023	9,8	39,3	0,11	0,9	166,3	4,92
CV (коэффициент вариации)		0,31	0,66	–	0,6	0,37	–
Б. н. п. Дроньки	2020	5,9	265,7	1,16	2,3	686,3	7,79
	2021	8,3	304,0	0,98	3,2	573,0	4,87
	2022	5,8	233,0	1,09	1,8	554,0	8,46
	2023	6,2	506,5	1,80	2,4	764,5	9,45
CV (коэффициент вариации)		0,24	0,65		0,28	0,31	–
Б. н. п. Масаны	2020	72,2	256,0	0,10	30,7	2759,7	2,37
	2021	65,6	311,0	0,13	29,2	2514,0	2,33
	2022	66,5	129,0	0,05	30,4	1598,0	1,42
	2023	71,3	203,0	0,08	28,4	2118,0	2,02
CV (коэффициент вариации)		0,12	0,39	–	0,13	0,32	–

Из данных табл. 2 следует, что за исследуемый период приведенные данные характеризуются высокой степенью вариабельности. Для определения статистической достоверности был рассчитан коэффициент вариации (CV), который показывает степень изменчивости по отношению к среднему показателю выборки. Коэффициент вариации для данных объекта б. н. п. Масаны соответствует самым низким значениям, а по объектам б.н.п. Бабчин и б. н. п. Дроньки коэффициент значительно больше. Можно заметить, что для плотности загрязнения почвы по всем объектам коэффициент вариации ниже, чем для удельной активности в биомассе мискантуса.

Коэффициент перехода ^{137}Cs в биомассу мискантуса характеризуется невысоким значением на дерново-подзолистых песчаных почвах в б. н. п. Масаны, значения изменяются от 0,05 до 0,13 Бк/кг : кБк/м². Однако коэффициент перехода ^{137}Cs значительно возрастает на дерново-подзолистых временно избыточно увлажненных почвах в б.н.п. Дроньки, значения изменяются от 0,98 до 1,8 Бк/кг : кБк/м². Коэффициент перехода ^{137}Cs в биомассу мискантуса в б. н. п. Бабчин характеризуется невысоким промежуточным значением на дерново-подзолистых глееватых почвах, значения изменяются от 0,09 до 0,27 Бк/кг : кБк/м². Существенные изменения значений коэффициента перехода объясняются степенью гидроморфизма почв, с увеличением гидроморфизма повышаются и параметры перехода радионуклидов в растения.

Анализ данных параметров перехода ^{90}Sr из почвы биомассу мискантуса свидетельствует, что тенденции взаимосвязи гидроморфизма почв и коэффициентов переход сохраняются. Так, в б. н. п. Масаны наблюдаются самые низкие значения КП (среднее значение за период исследований 2,03 Бк/кг : кБк/м²), несмотря на самое большое значение плотности загрязнения почвы. Параметры перехода ^{90}Sr на делянках в б. н. п. Дроньки характеризуются довольно высокими значениями и высокой степенью вариабельности, изменения значению колеблются от 4,87 до 9,45 Бк/кг:кБк/м². Для дерново-подзолистых глееватых почв находящихся в б. н. п. Бабчин, характерно изменение коэффициентов перехода от 4,92 до 8,96 Бк/кг : кБк/м².

В Республике Беларусь отсутствуют допустимые уровни содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в растительном сырье для мискантуса гигантского¹. Для вероятной оценки возможности его использования в непищевых целях приведем некоторые допустимые нормативы содержания ^{137}Cs , принятые в Беларуси для древесины (РДУ/ЛХ-2001): древесное технологическое сырье – 1480 Бк/кг; топливо древесное – 740 Бк/кг; прочая непищевая продукция лесного хозяйства – 1850 Бк/кг; топливо древесное, контрольный уровень для котельных мощностью >0,1 МВт – 200 Бк/кг; щепы топливная²– 300 Бк/кг (ТУ ВУ 100145188.003-2009). Содержание ^{90}Sr в лесопроductии не нормируется [34].

При прогнозе удельной активности цезия-137 в биомассе мискантуса учитывались рассчитанные коэффициенты перехода. В наших оценках удельная активность ^{137}Cs в растительном сырье, где возможно производство продукции из мискантуса сорта «Дружба-Автюки» в пределах РДУ/ЛХ-2001 и ТУ ВУ 100145188.003-2009, принималась на уровне минимального значения за годы исследований³. Результат отражен в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что получение нормативно чистой биомассы мискантуса гигантского для производства древесного технического сырья, топлива древесного и прочей непищевой продукции лесного хозяйства возможно без ограничений по плотности загрязнения Cs^{137} на дерново-подзолистых песчаных и дерново-подзолистых глееватых почвах (б. н. п. Масаны и б. н. п. Бабчин), однако в условиях повышенной степени гидроморфизма на дерново-подзолистых временно избыточно увлажненных почвах (б.н.п. Дроньки) возникают ограничения: 27,85 Ки/км² – для прочей непищевой продукции лесного хозяйства; 22,3 Ки/км² – для древесного технического сырья; 11,1 Ки/км² – для топлива древесного.

В условиях ужесточения радиологических требований при возделывании мискантуса на щепу топливную и топливо древесное (контрольный уровень для котельных мощностью >0,1 МВт) нормативно чистую биомассу возможно получать без ограничений по плотности загрязнения ^{137}Cs на дерново-подзолистых песчаных почвах. Однако на дерново-подзолистых глееватых почвах возникают ограничения: 29,9 Ки/км² – для щепы топливной; 19,9 Ки/км² – для топлива древесного (контрольный уровень для котельных мощностью > 0,1 МВт). Для производства нормативно чистой биомассы мискантуса на дерново-подзолистых временно избыточно увлажненных почвах есть ограничения по плотности загрязнения Cs^{137} : 4,5 Ки/км² – для щепы топливной; 3,0 Ки/км² – для топлива древесного (контрольный уровень для котельных мощностью >0,1 МВт).

¹РДУ/ЛХ-2001: ГН 2.6.1.10-1-01-2001. Республиканские допустимые уровни содержания цезия-137 в древесине, продукции из древесины и древесных материалов и прочей непищевой продукции лесного хозяйства. Минск, 2000. 5 с.

²ТУ ВУ 100145188.003-2009 Щепы топливная. Технические условия. Минск, 2009.

³Там же.

Таблица 3

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в биомассу мискантуса гигантского и прогнозные значения предельно допустимой плотности загрязнения почвы, Ки/км²

Table 3

Coefficients of transition of ^{137}Cs into the biomass of giant miscanthus and predicted values of the maximum permissible density of soil contamination, Ci/km²

Объект	2020	2021	2022	2023	Среднее значение
Бабчин(КП)	0,21	0,27	0,09	0,11	0,17
Масаны(КП)	0,10	0,13	0,05	0,08	0,09
Дроньки(КП)	1,16	0,98	1,09	1,80	1,26
Прочая непищевая продукция лесного хозяйства – 1850 Бк/кг					
Бабчин	238,18	184,35	531,30	462,52	292,67
Масаны	521,09	389,97	953,37	649,66	565,65
Дроньки	42,98	50,77	45,94	27,85	39,75
Древесное техническое сырье, 1480 Бк/кг					
Бабчин	190,5	147,5	425,0	370,0	234,1
Масаны	416,9	312,0	762,7	519,7	452,5
Дроньки	34,4	40,6	36,8	22,3	31,8
Топливо древесное, 740 Бк/кг					
Бабчин	95,3	73,7	212,5	185,0	117,1
Масаны	208,4	156,0	381,3	259,9	226,3
Дроньки	17,2	20,3	18,4	11,1	15,9
Щепа топливная – 300 Бк/кг					
Бабчин	38,6	29,9	86,2	75,0	47,5
Масаны	84,5	63,2	154,6	105,3	91,7
Дроньки	7,0	8,2	7,5	4,5	6,4
Топливо др., контрольный уровень для котельных мощностью >0,1 МВт – 200 Бк/кг					
Бабчин	25,7	19,9	57,4	50,0	31,6
Масаны	56,3	42,2	103,1	70,2	61,2
Дроньки	4,6	5,5	5,0	3,0	4,3

Закключение

Полученные прогнозные данные предельно допустимых плотностей загрязнения почвы Cs^{137} при возделывании мискантуса гигантского позволяют сделать вывод о перспективности выращивания на загрязненных радионуклидами землях.

По итогам проделанной исследовательской работы был сделан вывод: получение нормативно чистой биомассы мискантуса гигантского сорта «Дружба-Автюки» для производства древесного технического сырья, топлива древесного и прочей непищевой продукции лесного хозяйства возможно без ограничений по плотности загрязнения Cs^{137} на дерново-подзолистых песчаных и дерново-подзолистых глееватых почвах. Однако в условиях повышенной степени гидроморфизма на дерново-подзолистых временно избыточно увлажненных почвах возникают ограничения по плотности загрязнения почвы Cs^{137} : 27,85 Ки/км² –

для прочей непищевой продукции лесного хозяйства; 22,3 Ки/км² – для древесного технического сырья; 11,1 Ки/км² – для топлива древесного. Для подтверждения полученных результатов требуется проведение и углубление исследований по накоплению ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr мискантусом при разной плотности загрязнения данными радионуклидами и трансурановыми радионуклидами, разных уровнях минерального питания, различных почвенно-гидрологических условиях.

Библиографические ссылки

1. Беларусь и Чернобыль: 34 года спустя. В: Информационно-аналитические материалы. Минск: ИВЦ Минфина; 2020. 38 с.
2. Цыбулько НН Радиоактивное загрязнение территории Беларуси: динамика и современное состояние. *Экологический вестник*. 2012;2(1):80–85.
3. Величко ВВ, Уласевич МВ Анализ эффективности использования биогазовых установок. В: Басалай ИА, редактор. *Сборник материалов 73-й студенческой научно-технической конференции*. Минск : БНТУ; 2017. с. 49–55.
4. Лосева ЛА. Возделывание энергетических травянистых растений в условиях восточной части Беларуси. В: Маковская НВ, редактор. *Проблемы устойчивого развития регионов Республики Беларусь и сопредельных стран. Сборник научных статей XI международной научно-практической интернет-конференции*. Могилев: МГУ им. А. А. Кулешова; 2022. с. 8–11.
5. Шкляр АХ. Климатические ресурсы Белоруссии и использование их в сельском хозяйстве. Минск: Вышэйшая школа; 1973. 432 с.
6. Купцов НС, Попов ЕГ. Энергоплантации. *Справочное пособие по использованию энергетических растений*. Минск: Тэхналогія; 2015. 128 с.
7. Nijssen M, Smeets E, Stehfest E, et al. An evaluation of the global potential of bioenergy production on degraded lands. *Global Change Biology Bioenergy*. 2012;4(2):130–147.
8. Figala J, Vranova V, Rejsek K, Formanek P. Giant miscanthus (*Miscanthus x Giganteus* Greef et Deu.) – A promising plant for soil remediation: A Mini Review. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2015;63(6):2241–2246.
9. Wang C, Kong Y, Hu R, Zhou G. Miscanthus: a fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production. *Global Change Biology Bioenergy*. 2020;13(1):1–12.
10. Зинченко ВА, Яшин М. Энергия мискантуса. *Леспроектинформ*. 2011;6(80):134–140.
11. Капустянчик СЮ, Бурмакина НВ, Якименко ВН. Оценка эколого-агрохимического состояния агроценоза с многолетним выращиванием мискантуса в Западной Сибири. *Агрохимия*. 2020;9:65–73.
12. Гушина ВА, Остроборова НИ. Формирование биомассы мискантуса гигантского в лесостепи Среднего Поволжья. *Нива Поволжья*. 2019;3(52):81–87.
13. Капустянчик СЮ, Якименко ВН. Мискантус – перспективная сырьевая, энергетическая и фитомелиоративная культура (литературный обзор). *Почвы и окружающая среда*. 2020;3(3):126.
14. Yan J, Chen W, Luo F, et al. Variability and adaptability of *Miscanthus* species evaluated for energy crop domestication. *Global Change Biology Bioenergy*. 2012;4(1):49–60.
15. Hodkinson TR, Chase MW, Takahashi C, et al. The use of dna sequencing (ITS and trnL-F), AFLP, and fluorescent in situ hybridization to study allopolyploid *Miscanthus* (Poaceae). *American Journal of Botany*. 2002;89(2):279–286.
16. Bonin CL, Mutegi E, Chang H, Heaton EA. Improved feedstock option or invasive risk? Comparing establishment and productivity of fertile *miscanthus giganteus* to *miscanthus sinensis*. *Bioenergy Research*. 2017;10:317–328.
17. Бармет ЛВ, Дзюбенко ЕА. Прогнозирование областей культивирования *Miscanthus sacchariflorus* (Poaceae) на территории Российской Федерации. *Vavilova*. 2019;2(4):35–49.
18. Булаткин ГА. Исследование эффективности энергетических культур на примере мискантуса китайского (*Miscanthus sinensis* Anderss). *Экологический вестник России*. 2018;10:36–41.
19. Сакович ГВ, Скиба ЕА, Гладышева ЕК, Голубев ДС, Будаева ВВ. Мискантус – сырье для производства бактериальной целлюлозы. *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2020;495:35–38.
20. Гушина ВА, Остроборова НИ. Формирование биомассы мискантуса гигантского в лесостепи Среднего Поволжья. *Нива Поволжья*. 2019;3(52):81–87.
21. Дорогина ОВ, Васильева ОЮ, Нуждина НС и др. Формирование и изучение коллекционного генофонда ресурсных видов рода *Miscanthus* Anderss. в условиях лесостепи Западной Сибири. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(7):926–932.
22. Lewandowski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Myrsini C. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*. 2003;25(4):335–361.
23. Blanco-Canqui H, Gilley J, Eisenhauer D, Boldt A. Soil carbon accumulation under switchgrass barriers. *Agronomy Journal*. 2014;106(6):2185–2192.
24. Robertson AD, Davies Ch A, Smith P, et al. Carbon inputs from *Miscanthus* displace older soil organic carbon without inducing priming. *BioEnergy Research*. 2017;10:86–102.
25. Капустянчик СЮ, Данилова АА, Лихенко ИЕ. *Miscanthus sacchariflorus* в Сибири. Параметры продукционного процесса, динамика биофильных элементов. *Сельскохозяйственная биология*. 2021;1:25–33.
26. Himken M, Lammel J, Neukirchen D, et al. Cultivation of *Miscanthus* under West European conditions: seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization. *Plant and Soil*. 1997;189:117–126.
27. Lewandowski I, Kicherer A. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. *European Journal of Agronomy*. 1997;6(3–4):163–177.
28. Lewandowski I, Clifton-Brown JC, Scurlock JMO. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*. 2000;19(4):209–227.

29. Naidu SL, Moose SP, Al-Shoaibi AK, et al. Gold tolerance in *Miscanthus x giganteus*: adaptation in amounts and sequence of C4 photosynthetic enzymes. *Plant Physiology*. 2003;132:1688–1697.
30. Heaton EA, Flavell RB, Mascia PN, et al. Herbaceous energy crop development: recent progress and future prospects. *Current Opinion in Biotechnology*. 2008;19(3):202–209.
31. Доспехов БА. *Методика полевого опыта*. Москва: Агропромиздат; 1985. 351 с.
32. Мельник ВИ, и др. Агроклиматическое зонирование территории Беларуси с учетом изменения климата. Минск – Женева: [б. и.]; 2017. с. 6–8.
33. Цыбулько НН, Шашко АВ, Жукова ИИ, Евсеев ЕБ. Влияние азотных и калийных удобрений на накопление ^{137}Cs многолетними бобово-злаковыми и злаковыми травами на торфяных почвах. *Мелиорация*. 2021;4(98):35–45.
34. Евсеев ЕБ, Кудин МВ, Гарбарук ДК, Воронцовская АН, Драгун АВ. Перспективная энергетическая культура *Miscanthus giganteus* на загрязненных радионуклидами землях. *Радиобиология и экологическая безопасность – 2024. Сборник научных статей по материалам международной научной конференции*. Гомель: Институт радиобиологии НАН Беларуси; 2024. с. 85–88.

References

1. Belarus' i Chernobyl': 34 goda spustya. *Informacionno-analiticheskie materialy* [Belarus and Chernobyl: 34 years later. Information and analytical materials]. Минск: IVC Minfina; 2020. 38 p. Russian.
2. Cybul'ko NN. Radioaktivnoe zagryaznenie territorii Belarusi: dinamika i sovremennoe sostoyanie [Radioactive contamination of the territory of Belarus: dynamics and current state]. *Ekologicheskij vestnik BGU*. 2012;2(1):80–85. Russian.
3. Velichko VV, Ulasevich MV. Analiz effektivnosti ispol'zovaniya biogazovykh ustanovok [Analysis of the efficiency of using biogas plants]. In: Basalaj IA, editor. *Sbornik materialov 73-j studencheskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Минск: BNTU; 2017. p. 49–55. Russian.
4. Loseva LA. Vozdeleyvanie energeticheskikh travyanistykh rastenij v usloviyah vostochnoj chasti Belarusi [Cultivation of energy herbaceous plants in the conditions of the eastern part of Belarus]. In: Makovskaya NV, editor. *Problemy ustojchivogo razvitiya regionov Respubliki Belarus' i sopredel'nyh stran: sbornik nauchnykh statej HI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy internet-konferencii*. Mogilev: MGU imeni A. A. Kuleshova; 2022. p. 8–11. Russian.
5. Shklyar AH. Klimaticheskie resursy Belorussii i ispol'zovanie ih v sel'skom hozyajstve [Climatic resources of Belarus and their utilization in agriculture]. Минск: Vyshejschaya shkola; 1973. 432 p. Russian.
6. Kupcov NS, Popov EG. *Energoplantacii. Spravochnoe posobie po ispol'zovaniyu energeticheskikh rastenij* [Energoplantations. Reference manual on the use of energy plants]. Минск: Tekhnologiya; 2015. 128 p. Russian.
7. Nijsen M, Smeets E, Stehfest E et al. An evaluation of the global potential of bioenergy production on degraded lands. *Global Change Biology Bioenergy*. 2012;4(2):130–147.
8. Figala J, Vranova V, Rejsek K, Formanek P. Giant miscanthus (*Miscanthus x Giganteus* Greef et Deu.) – A promising plant for soil remediation: A Mini Review. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2015;63(6):2241–2246.
9. Wang C, Kong Y, Hu R, Zhou G. Miscanthus: a fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production. *Global Change Biology Bioenergy*. 2020;13(1):1–12.
10. Zinchenko VA, Yashin M. *Energiya miskantusa* [The energy of miscanthus]. *Lesprominform*. 2011;6(80):134–140. Russian.
11. Kapustyanchik SY, Burmakina NV, Yakimenko VN. Ocenka ekologo-agrohimicheskogo sostoyaniya agrocenoza s mnogoletnim vyrashchivaniem miskantusa v Zapadnoj Sibiri [Assessment of ecological and agrochemical condition of agrocenosis with perennial cultivation of miscanthus in Western Siberia]. *Agrohimiya*. 2020;9:65–73. Russian.
12. Gushchina VA, Ostroborodova NI. Formirovanie biomassy miskantusa gigantskogo v lesostepi Srednego Povolzh'ya [Formation of biomass of *Miscanthus giganteus* in the forest-steppe of the Middle Volga region]. *Niva Povolzh'ya*. 2019;3(52):81–87. Russian.
13. Kapustyanchik SY, Yakimenko VN. *Miskantus – perspektivnaya syr'evaya, energeticheskaya i fitomeliorativnaya kul'tura (literaturnyj obzor)* [Miscanthus – promising raw material, energy and phytomeliorative crop (literature review)]. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*. 2020;3(3):126. Russian.
14. Yan J, Chen W, Luo F, et al. Variability and adaptability of *Miscanthus* species evaluated for energy crop domestication. *Global Change Biology Bioenergy*. 2012;4(1):49–60.
15. Hodkinson TR, Chase MW, Takahashi C, et al. The use of dna sequencing (ITS and trnL-F), AFLP, and fluorescent in situ hybridization to study allopolyploid *Miscanthus* (Poaceae). *American Journal of Botany*. 2002;89(2):279–286.
16. Bonin CL, Mutegi E, Chang H, Heaton EA. Improved feedstock option or invasive risk? Comparing establishment and productivity of fertile *Miscanthus giganteus* to *Miscanthus sinensis*. *Bioenergy Research*. 2017;10:317–328.
17. Bagmet LV, Dzyubenko EA. Prognozirovaniye oblastej kul'tivirovaniya *Miscanthus sacchariflorus* (Poaceae) na territorii Rossijskoj Federacii [Predicting areas of *Miscanthus sacchariflorus* (Poaceae) cultivation on the territory of the Russian Federation]. *Vavilova*. 2019;2(4):35–49. Russian.
18. Bulatkin GA. Issledovanie effektivnosti energeticheskikh kul'tur na primere miskantusa kitajskogo (*Miscanthus sinensis* Anderss) [Study of the efficiency of energy crops on the example of Chinese *Miscanthus sinensis* Anderss (*Miscanthus sinensis* Anderss)]. *Ekologicheskij vestnik Rossii*. 2018;10:36–41. Russian.
19. Sakovich GV, Skiba EA, Gladysheva EK, Golubev DS, Budaeva VV. *Miskantus – syr'e dlya proizvodstva bakterial'noj nanocellyulozy* [Miscanthus – raw material for the production of bacterial nanocellulose]. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Himiya, nauki o materialah*. 2020;495:35–38. Russian.
20. Gushchina VA, Ostroborodova NI. Formirovanie biomassy miskantusa gigantskogo v lesostepi Srednego Povolzh'ya [Formation of biomass of *Miscanthus giganteus* in the forest-steppe of the Middle Volga region.]. *Niva Povolzh'ya*. 2019;3(52):81–87. Russian.
21. Dorogina OV, Vasil'eva OYu, Nuzhdina NS, et al. Formirovanie i izuchenie kollekcionnogo genofonda resursnykh vidov roda *Miscanthus* Anderss. v usloviyah lesostepi Zapadnoj Sibiri [Formation and study of the collection gene pool of resource species of

the genus *Miscanthus* Anderss. in the conditions of the forest-steppe of Western Siberia]. *Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii*. 2019;23(7):926–932. Russian.

22. Lewandowski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Myrsini C. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*. 2003;25(4):335–361.

23. Blanco-Canqui H, Gilley J, Eisenhauer D, Boldt A. Soil carbon accumulation under switchgrass barriers. *Agronomy Journal*. 2014;106(6):2185–2192.

24. Robertson AD, Davies Ch A, Smith P, et al. Carbon inputs from *Miscanthus* displace older soil organic carbon without inducing priming. *BioEnergy Research*. 2017;10:86–102.

25. Kapustyanchik SY, Danilova AA, Lihenko IE. *Miscanthus sacchariflorus* v Sibiri. Parametry produkcionnogo processa, dinamika biofil'nyh elementov [Miscanthus sacchariflorus in Siberia. Parameters of the production process, dynamics of biophilic elements]. *Sel'skohozyajstvennaya biologiya*. 2021;1:25–33. Russian.

26. Himken M, Lammel J, Neukirchen D, et al. Cultivation of *Miscanthus* under West European conditions: seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization. *Plant and Soil*. 1997;189:117–126.

27. Lewandowski I, Kicherer A. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. *European Journal of Agronomy*. 1997;6(3–4):163–177.

28. Lewandowski I, Clifton-Brown JC, Scurlock JMO. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*. 2000;19(4):209–227.

29. Naidu SL, Moose SP, Al-Shoaibi AK, et al. Gold tolerance in *Miscanthus x giganteus*: adaptation in amounts and sequence of C4 photosynthetic enzymes. *PlantPhysiology*. 2003;132:1688–1697.

30. Heaton EA, Flavell RB, Mascia PN, et al. Herbaceous energy crop development: recent progress and future prospects. *Current Opinion in Biotechnology*. 2008;19(3):202–209.

31. Dospikhov BA. *Metodika polevogo opyta* [Methodology of field experience]. Moskva: Agropromizdat;1985. 351 p. Russian.

32. Mel'nik VI, et al. *Agroklimaticheskoe zonirovaniye territorii Belarusi s uchetom izmeneniya klimata* [Agroclimatic zoning of the territory of Belarus taking into account climate change]. Minsk – Zheneva: [publisher unknown]; 2017. p. 6–8. Russian.

33. Cybul'ko NN, Shashko AV, Zhukova II, Evseev EB. *Vliyanie azotnyh i kalijnyh udobrenij na nakopleniye ¹³⁷Cs mnogoletnimi bobovo-zlakovymi i zlakovymi travami na torfyanyh pochvah* [Effect of nitrogen and potassium fertilizers on ¹³⁷Cs accumulation by perennial legume-grass and cereal grasses on peat soils]. *Melioraciya*. 2021;4(98):35–45. Russian.

34. Evseev EB, Kudin MV, Garbaruk DK, Voroneckaya AN, Dragun AV. *Perspektivnaya energeticheskaya kul'tura miscanthus giganteus na zagryaznennyh radionuklidami zemlyah. Radiobiologiya i ekologicheskaya bezopasnost' – 2024* [Prospective energy crop miscanthus giganteus on radionuclide-contaminated lands]. In: *Sbornik nauchnyh statej po materialam mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. Gomel': Institut radiobiologii NAN Belarusi; 2024. p. 85–88. Russian.

Статья поступила в редколлегию 27.08.2024.

Received by editorial board 27.08.2024.

УДК 53.072.8

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГОВ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРЕПАРАТА НА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРЕДУЧЕВОЙ ПОДГОТОВКИ К РАДИОХИРУРГИИ

Е. В. ЕМЕЛЬЯНЕНКО¹⁾, И. А. ШТУРО¹⁾, М. Н. ПЕТКЕВИЧ¹⁾

¹⁾Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова,
агродорожок Лесной, 223040, Минский район, Беларусь

Выполнено сканирование фантома, имитирующего головной мозг, с установленными внутри моделями-сферами различного диаметра на позитронно-эмиссионном томографе (ПЭТ), совмещенном с компьютерным рентгеновским томографом (КТ), и магнитно-резонансным томографом (МРТ). При выполнении МР сканирования данного фантома с целью визуализации установленных сфер их объемы заполнялись контрастным веществом пентагидратом сульфата меди ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), что способствовало его чувствительности к химическим сдвигам и артефактам восприимчивости (дополнительным причинам искажений, возникающим при столкновении с различиями в плотности при диагностической МРТ и планировании лучевой терапии). Произведена качественная оценка полученных изображений для каждой последовательности на предмет артефактов. Выполнен количественный анализ полученных результатов ПЭТ/КТ сканирования: точность восстановления объемной активности моделей-сфер (патологических очагов накопления радиофармацевтического препарата). С учетом высокой практической значимости лечения патологических образований малого объема дополнительно в качестве моделей (патологических очагов) были использованы сферы с внутренним диаметром 4 и 6 мм. Установлено влияние количества подмножеств на диагностическую информативность ПЭТ/КТ изображения, а также на значение коэффициентов восстановления. Выполнено оконтуривание моделей-сфер на КТ- и МРТ-изображениях пятью врачами-рентгенологами с целью оценки влияния персональной вариативности на конечный внесенный контур структур. На ПЭТ/КТ-изображениях различных модальностей оконтурены модели патологических очагов, рассчитаны разницы номинальных значений и объемов оконтуривания. Получены значения девиации коэффициентов восстановления контраста моделей-сфер диаметрами 4–2 мм на ПЭТ-изображениях, реконструированных с различными параметрами. Произведена оценка влияния параметров реконструкции на формирование результирующего объема оконтуривания моделей-сфер разного диаметра на ПЭТ-изображениях, реконструированных с различным числом подмножеств (18 и 24), а также с различными значениями фильтра Гаусса.

Ключевые слова: оконтуривание; ПЭТ/КТ; МРТ; девиация объема; диагностическое изображение; эффект частичного объема.

Образец цитирования:

Емельяненко ЕВ, Штуро ИА, Петкевич МН. Неопределенности вычисления геометрических параметров очагов накопления радиофармацевтического препарата на диагностических изображениях при проведении предлучевой подготовки к радиохирургии. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;4:55–60.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-55-60>

For citation:

Emelianenko EV, Shturo IA, Piatkevich MN. Uncertainties in calculating the geometric parameters of radiopharmaceutical accumulation lesion on diagnostic images during pre-radiation preparation for radiosurgery. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;4:55–60. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-55-60>

Авторы:

Евгений Владимирович Емельяненко – кандидат технических наук; инженер лаборатории позитронно-эмиссионной томографии.

Максим Николаевич Петкевич – магистр медицинской физики; начальник отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии.

Ирина Александровна Штуро – магистр медицинской физики отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии.

Authors:

Evgeny V. Emelianenko, PhD (engineering); engineer at the laboratory of positron emission tomography.

zheka-ava@mail.ru

Maksim N. Piatkevich, master of medical physics; head of the department of radiotherapy engineering support.

maxpetkevichN@gmail.com

Irina A. Shturo, master of medical physics at the department of engineering support of radiation therapy.

irina.shturo@mail.ru

UNCERTAINTIES IN CALCULATING THE GEOMETRIC PARAMETERS OF RADIOPHARMACEUTICAL ACCUMULATION LESION ON DIAGNOSTIC IMAGES DURING PRE-RADIATION PREPARATION FOR RADIOSURGERY

E. V. EMELIANENKO^a, I. A. SHTURO^a, M. N. PIATKEVICH^a

*^aN. N. Alexandrov National Cancer Centre,
agro-town Lesnoy, 223040 Minsk District, Belarus
Corresponding author: E. V. Emelianenko (zheka-ava@mail.ru)*

The phantom (imitating the brain) with different diameter models-spheres installed inside was scanned on positron emission tomography (PET) combined with computed X-ray tomography (CT) and magnetic resonance tomography (MRI). When MR scans of this phantom were performed to visualize the instilled spheres, their volumes were filled with the contrast agent copper sulfate pentahydrate ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), which contributes to its sensitivity to chemical shifts and susceptibility artifacts (additional causes of distortion arising from encountering density differences in diagnostic MRI and radiation therapy planning). Qualitative assessment of the obtained images for each sequence for artifacts was performed. Quantitative analysis of the obtained PET/CT scanning results was performed, namely, the accuracy of recovery of volumetric activity of model-spheres (pathological foci of radiopharmaceutical accumulation). Taking into account high practical significance of treatment of pathological formations of small volume, spheres with inner diameter of 4 and 6 mm were used additionally as models (pathological foci). The influence of the number of subsets on the diagnostic informativity of PET/CT images, as well as on the value of recovery coefficients was established. Contouring of models-spheres on CT and MR images by five radiologists was performed in order to evaluate the influence of personal variability on the final contour of structures. Also, models of pathologic foci were delineated on the obtained PET/CT images of different modalities, and differences in nominal values and delineation volumes were calculated. Deviation values of contrast recovery coefficients of model-sphere models with diameters of 4–22 mm on PET images reconstructed with different parameters were obtained. The influence of reconstruction parameters on the formation of the resulting volume of model-sphere delineation of different diameter on PET images reconstructed with different number of subsets (18 and 24), as well as with different values of the Gaussian filter was evaluated.

Keywords: contouring; PET/CT; MRI; volume deviation; diagnostic image; partial volume effect.

Введение

Качество диагностических изображений играет ключевую роль в процессе планирования лучевой терапии и последующем лечении патологий различной этиологии. В понятие «качество» включены следующие критерии, предъявляемые в современной медицинской визуализации:

- отсутствие артефактов (искажений);
- приемлемый уровень шума (в частности для КТ-изображений, не более установленного производителем оборудования);
- точность совмещения изображений различных модальностей (например, ПЭТ/КТ, ПЭТ/МРТ);
- оптимальное соотношение сигнал/шум (SNR), что актуально для всех видов модальностей изображений;
- точность восстановления качественной и количественной информации (число единиц Хаунсфилда для КТ, стандартизированный показатель накопления радиофармацевтического препарата на ПЭТ-изображениях) [1].

Перечисленные критерии оказывают непосредственное влияние на точность определения геометрических параметров патологических очагов и критических структур на диагностических изображениях, а в последующем и на точность доставки предписанной дозы к зоне облучения при проведении предлучевой подготовки к радиохирургии. Данный метод облучения предполагает прецизионную доставку всей предписанной дозы ионизирующего излучения к небольшим внутричерепным мишеням за один сеанс. Качество получаемого изображения зависит от возможностей оборудования и программно-вычислительного комплекса, применяемого для реконструкции изображения с различными входными параметрами. Помимо изменения качественных характеристик изображения, вариация параметрами реконструкции может повлиять на формирование границ патологического очага [2; 3].

Особый интерес в рамках данного исследования представляет точное определение границ малых структур (диаметром менее 2 см), которые особо подвержены влиянию программно-аппаратного комплекса.

Цель исследования – оценка девиации в определении границ оконтуриваемых объемов моделей-сфер на МРТ- и КТ-изображениях, а также ПЭТ-изображениях, реконструированных с различными параметрами (числом подмножеств и размерности фильтра Гаусса).

Материалы и методы исследования

Для моделирования патологических очагов использовался фантом, имитирующий головной мозг, с инсталлированными внутрь сферами с диаметрами 22 мм, 17, 13, 10, 6, 4 мм. Выбор размеров моделей обоснован пространственным разрешением ПЭТ/КТ томографа. Исследование проведено в соответствии со следующими этапами:

- наполнение фантома и сфер радиофармацевтическим препаратом (РФП);
- позиционирование в индикаторной коробке и последующее сканирование на ПЭТ/КТ-томографе;
- реконструкция изображений со следующими параметрами: VPHD+PSF, включая серии с количеством подмножеств итераций 18/2, 24/2, 32/2, при значении фильтра Гаусса 6,4, а также серии со значениями фильтра Гаусса 5,8 мм и 7 мм и стабильным числом подмножеств/итераций 24/2;
- очистка фантома и сфер, наполнение объемов сфер парамагнитным контрастным веществом для МРТ, представляющем собой нейтральный (неионный) комплекс гадолиния (III) с макроциклическим лигандом, и выполнение МР сканирования данного фантома;
- оконтуривание (определение границ) сфер на ПЭТ/КТ- и МРТ-изображениях, полученных в результате сканирования.

Все серии МР-сканирования фантома выполнялись в соответствии с клиническими требованиями (рис. 1): установленной МР индикаторной коробкой (для определения стереотаксического трехмерного пространства в планирующей системе) и адаптером для головной катушки *Siemens* (с соблюдением точно-го выравнивания осей сканирования).

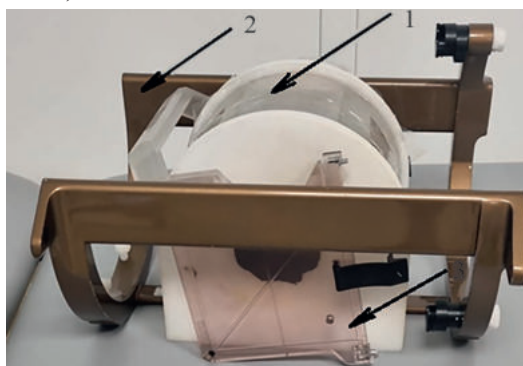


Рис. 1. Фантом с установленной МР индикаторной коробкой и адаптером для головной катушки Siemens:

1 – фантом с инсталлированными внутрь моделями-сферами, 2 – адаптер для головной катушки, 3 – индикаторная коробка

Fig. 1. Phantom with installed MR indicator box and adapter for Siemens head coil:

1 – phantom with model-spheres installed inside, 2 – adapter for head coil, 3 – indicator box

Исследование выполнено на МРТ 1,5 Тл (*Siemens MAGNETOM Avanto 1,5T*). Параметры МРТ-сканирования представлены в табл. 1. Выполнено две последовательности (T1-взвешенные изображения и T2).

Таблица 1

Параметры сканирования фантома на МРТ

Table 1

MRI phantom scanning parameters

Параметры сканирования	Наименование режима сканирования МРТ	
	T1	T2
Продолжительность повторения (мс)	8,8	4000
Время эхосигнала (мс)	4,76	101
Номинальный угол поворота (°)	90	90
Поле исследования (мм ²)	256	230
Матрица регистрации (пиксели)	256×256	256×100
Полоса пропускания (Гц/пиксель)	130	260
Число срезов	160	80
Толщина срезов (мм)	1	2
Направление фазового кодирования	R-L	R-L
Направление частотного кодирования	A-P	A-P
Направление отбора срезов	H-F	H-F
Время сканирования (мс)	5,39	8,08

Анализ МРТ- и КТ-изображений. Произведена качественная оценка полученных МР-изображений для каждой последовательности на предмет артефактов. Полосы пропускания были выбраны близких к 300 Гц/пиксель для всех последовательностей МРТ с целью минимизации артефактов, вызванных магнитной восприимчивостью. На всех сериях реконструированных изображений контуры сфер хорошо визуализировались.

Изображения, полученные на МР-томографе, импортированы в рабочую станцию *Leksell Gamma Plan*, где осуществлялось определение границ и оконтуривание объем сфер рис. 2.

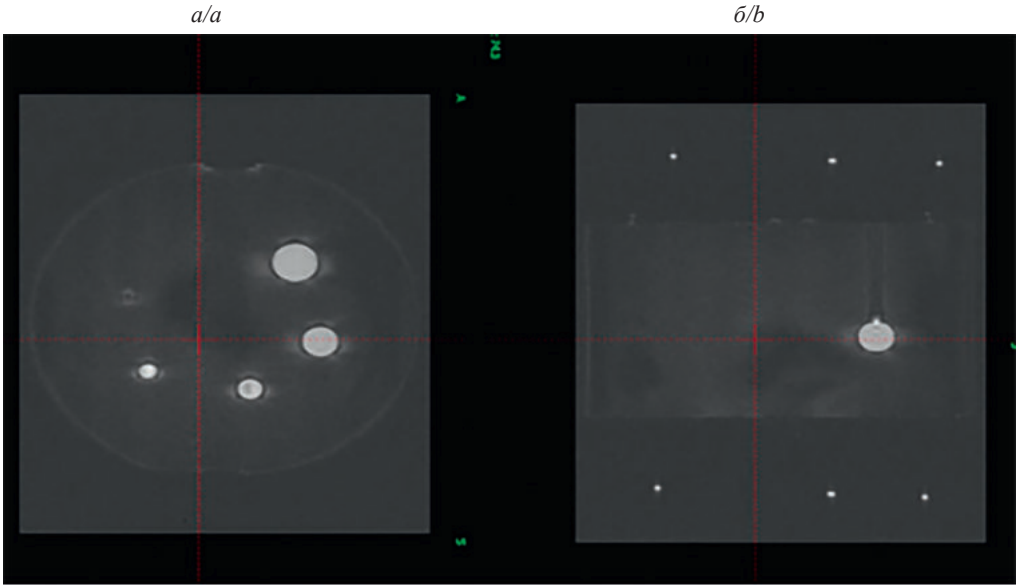


Рис. 2. МР-изображения фантома в аксиальной (а) и корональной (б) проекциях

Fig. 2. MR-images of the phantom in axial (a) and coronal (b) projections

Оконтуривание КТ- и МРТ-изображений моделей-сфер производилось вручную пятью врачами-рентгенологами с целью оценки влияния персональной вариабельности на конечный внесенный контур структур. Получено пять наборов трехмерных контуров всех шести сфер. Средние значения объемов оконтуривания моделей-сфер на КТ- и МР-изображениях и их разница с номинальными объемами моделей-сфер представлены в табл. 2.

Таблица 2

Геометрические характеристики контуров сфер на МРТ и КТ изображениях

Table 2

Geometric characteristics of sphere contours on MRI and CT images

Номинальный объем сфер, мм ³	Среднее значе- ние на МРТ, мм ³	Стандартное отклонение	Девияция,%	Среднее значение на КТ, мм ³	Стандартное отклонение	Девияция,%
5572,45	5896,12	62,42	5,81	5584,12	77,44	0,21
2571,14	2678,82	57,35	4,19	2588,50	21,87	0,68
1149,76	1186,26	48,66	3,17	1153,05	30,91	0,29
523,33	541,33	19,41	3,44	544,95	10,70	4,13
113,04	132,56	15,83	17,27	124,25	3,26	9,92
33,49	43,14	3,92	28,81	37,77	0,99	12,77

Установлено, что при внесении контура сфер на МР- и КТ-изображениях, девиация в определении границ полученных объемов была наибольшей для сфер диаметром 6 и 4 мм во всех пяти вариациях Данное отклонение объясняется эффектом частичного объема, что является главным ограничивающим фактором, препятствующим точному определению малых объемов структур.

Анализ ПЭТ-изображений. Изображения моделей-сфер, полученные в результате сканирования фантома на ПЭТ/КТ-сканере импортированы в систему *Eclipse* для дальнейшей обработки и снятия количественной информации. Выбор в пользу данного программного обеспечения (ПО) обусловлен его преимуществами, связанными с возможностью исключения человеческого фактора при оконтуривании, что было трудно достижимо при использовании *Leksell Gamma Plan*.

В клинической практике формирование контуров патологических очагов на ПЭТ-изображениях производится на основе полученных данных КТ-исследований. Однако в ряде случаев патологические очаги накопления РФП, присутствующие на ПЭТ-изображениях, могут отсутствовать на КТ-визуализациях. Оконтуривание очагов накопления радиоактивного индикаторного вещества по ПЭТ-изображениям затруднено по причине выраженных краевых эффектов и низкой точности восстановления объемной активности радиоактивного индикаторного вещества в структурах диаметром менее 10 мм (эффект частичного объема – ЭЧО). На рис. 3 представлен график зависимости коэффициента восстановления от диаметра сферы с учетом количества подмножеств (количество свободных проекций), используемых при реконструкции.

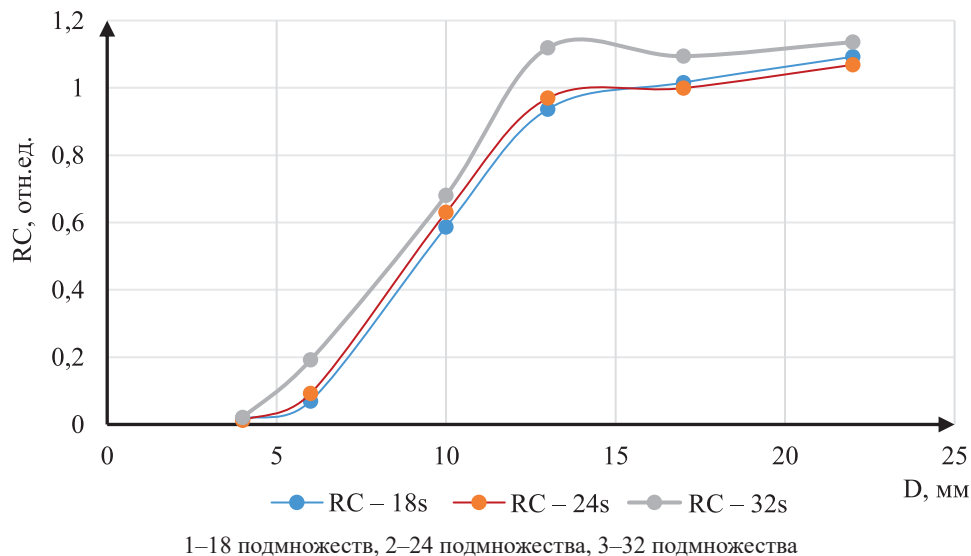


Рис. 3. Зависимость коэффициента восстановления контраста (RC) от диаметра (d) моделей сфер с учетом параметров реконструкции ПЭТ-изображения

Fig. 3. Dependence of contrast recovery coefficient (RC) on the diameter (d) of sphere models taking into account PET image reconstruction parameters

Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии количества используемых подмножеств на значение коэффициентов восстановления (далее – RC). Для сфер диаметрами 4 и 6 мм увеличение числа подмножеств с 18 до 24 на реконструированных изображениях позволило увеличить значение RC на 16 и 63 % соответственно. Помимо полученных численных значений RC наблюдается разница и при визуальной оценке изображений.

ПЭТ-изображение характеризуется цветовой градиентной структурой, позволяющей визуально оценивать уровень накопления радиоактивного индикаторного вещества. С целью исключения влияния субъективной (визуального восприятия) оценки на количественные результаты, формирование контуров осуществлялось путем указания уровня цветового градиента выраженного в %.

В системе *Eclipse* выполнено оконтуривание моделей-сфер на ПЭТ-изображениях, реконструированных с алгоритмом VPHD, и числом подмножеств/итераций 24/2, с учетом различного значения цветового градиента, выраженного в %. В качестве примера в табл. 3 приведены численные значения градиентов и соответствующие значения объемов оконтуривания, ошибка по сравнению с номинальным объемом – Бк. Вычислены абсолютные значения разницы оконтуренных объемов ПЭТ и МРТ – $B_{\text{МРТ}}$, ПЭТ и КТ – $B_{\text{КТ}}$.

Исходя из полученных численных значений сделаны следующие выводы:

- визуализация моделей-сфер диаметром от 10 до 22 мм является приемлемой для определения их геометрических параметров с достаточной точностью;
- визуализация моделей-сфер диаметром менее 10 мм является неприемлемой для определения их геометрических параметров с достаточной точностью;
- объем визуализируемого объекта линейно зависит от уровня градиента.

Таблица 3

Численные значения градиентов и соответствующие значения объемов оконтуривания

Table 3

Numerical values of gradients and corresponding values of delineation volumes

Д сферы, мм ³	Номинальный V мм ³	V мм ³ , ПЭТ (D710). VPHD 24/2	Градиент	БК, %	Б _{МРТ} , %	Б _{ст} , %
22	5572,45	5500	42	1,3	6,72	1,51
17	2571,14	2400	39	6,66	10,41	7,28
13	1149,76	1200	34	4,37	1,16	4,07
10	523,33	500	50	4,46	7,63	8,25
6	113,04	100	86	11,54	24,56	19,52
4	33,49	100	90	198,57	131,80	164,76

Выполнено оконтуривание сфер на ПЭТ-изображениях, реконструированных с различным значением фильтра Гаусса. Представленное на рис. 4 несоответствие границ контуров при условии использования одного цветового градиента свидетельствует о влиянии параметров реконструкции ПЭТ-изображения на формировании результирующего объема оконтуривания, а вероятно и формирования дозового распределения.

Для оценки влияния параметров реконструкции на формирование объема оконтуривания моделей-сфер (диаметрами 6 и 22 мм) на ПЭТ-изображениях, реконструированных с различным числом подмножеств (18 и 24), а также со значениями фильтра Гаусса 5,8 и 6,4 мм, нанесен контур с одинаковым уровнем градиента (40 %).

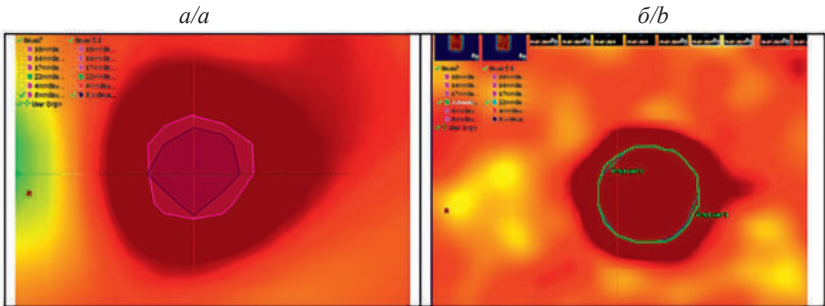


Рис. 4. Контур, нанесенные на аксиальные проекции ПЭТ-изображений моделей патологических очагов, реконструированных с различными параметрами фильтра Гаусса:
а – Гауссов фильтр 5,8 мм и 6,4 мм на сфере 6 мм; б – Гауссов фильтр 5,8 и 6,4 на сфере 22 мм

Fig. 4. Contours plotted on axial projections of PET images of models of pathologic foci reconstructed with different parameters of Gaussian filter: а – Gaussian filter 5.8 mm and 6.4 mm on the sphere of 6 mm; б – Gaussian filter 5.8 and 6.4 on the sphere of 22 mm

Полученные результаты (несоответствие контуров на сфере диаметром 6 мм) подтверждают влияние ЭЧО на формирование объема оконтуривания.

Заключение

В клинической практике формирование контуров патологических очагов на ПЭТ-изображениях производится на основе полученных данных КТ-исследований. Однако в ряде случаев патологические очаги накопления РФП, присутствующие на ПЭТ-изображениях, могут отсутствовать на КТ-визуализациях. Выявлено, что на формирование объема оконтуривания (на ПЭТ-изображениях), помимо параметров сканирования, значительный вклад вносит уровень цветового градиента. Затруднено оконтуривание сфер диаметром менее 6 мм по ПЭТ-изображениям по причине выраженного эффекта частичного объема, а следовательно, и заниженным значениям коэффициентов восстановления (1,7 и 7 % для сфер диаметрами 4 и 6 мм соответственно).

Данное исследование выполнялось в рамках конкурса на соискание грантов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований для молодых ученых «Наука М».

Библиографические ссылки / References

1. Grosu AL, Piert M, Weber WA, Jeremic B, Picchio M, Schratzenstaller U, Zimmermann FB, Schwaiger M. Positron emission tomography for radiation treatment planning. *Strahlentherapie und Onkologie*. 2005;181(8):483–499.
2. Parodi, K. Vision 20/20: positron emission tomography in radiation therapy planning, delivery, and monitoring. *Medical physics*. 2015;42(12):7153–7168.
3. van der Vos CS, Koopman D, Rijnsdorp S, Arends AJ, Boellaard R, van Dalen JA, Lubberink M, Willemsen ATM, Visser EP. Quantification, improvement, and harmonization of small lesion detection with state-of-the-art PET. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2017;44(1):4–16.

Статья поступила в редколлегию 06.11.2024.
Received by editorial board 06.11.2024.

WEB-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЕ НАСЕЛЕНИЯ И ОБЪЕКТОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ УРОВНЯХ

В. В. ЖУРАВКОВ¹⁾, Б. А. ТОНКОНОГОВ¹⁾, М. Г. ГЕРМЕНЧУК¹⁾, Н. Н. ЦЫБУЛЬКО¹⁾

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

Рассмотрены архитектура, функциональность и модель данных Web-ориентированной информационно-аналитической системы для совершенствования комплекса радиационной защиты населения и объектов окружающей среды на различных региональных уровнях. Исследуются методы, алгоритмы и технологии построения архитектуры и оптимизированной реляционной структуры (модели) данных, состоящей из таблиц, включающих поля для хранения параметров и информации об объектах и ресурсном потенциале, информационно-аналитической системы общего доступа для совершенствования комплекса радиационной защиты населения и объектов окружающей среды на различных региональных уровнях.

Цель исследования – разработка архитектуры информационно-аналитической системы и оптимизированной реляционной структуры (модели) данных, состоящей из таблиц, включающих поля для хранения параметров и информации об объектах и ресурсном потенциале, определение специализированного программного обеспечения, используемого при разработке информационно-аналитической системы для совершенствования радиационной защиты населения и объектов окружающей среды, в том числе по оценке радиоэкологических рисков. В задачи исследования входят следующие направления: разработка архитектуры информационно-аналитической системы; определение общего архитектурного стиля и основных архитектурных решений; определение и организация совокупности элементов и компонентов; определение функциональности программных модулей системы; описание основных ролей и характеристик структурных элементов и возможных видов взаимодействий между ними (интерфейсов), соответствие их модульной декомпозиции; наделение свойствами гибкости, масштабируемости и открытости для расширения и реализации дополнительной функциональности. Разработана структура данных: определение назначения и содержания таблиц; полей таблиц и их типов; связей между таблицами; реализация функциональных объектов базы данных, обеспечивающих модульность, масштабируемость и переносимость. Выделено специализированное программное обеспечение, используемое при разработке информационно-аналитической системы: выбор интегрированной среды

Образец цитирования:

Журавков ВВ, Тонконогов БА, Герменчук МГ, Цыбулько НН. Web-ориентированная информационно-аналитическая система для совершенствования мероприятий по радиационной защите населения и объектов окружающей среды на различных региональных уровнях. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;4:61–73. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-61-73>

For citation:

Zhuravkov VV, Tonkonogov BA, Germenchuk MG, Tsybulka MM. Web-oriented information and analytical system for improving complex of radiation protection of population and environmental objects at various regional levels. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;4:61–73. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-61-73>

Авторы:

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

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

Борис Александрович Тонконогов – кандидат технических наук, доцент; декан факультета мониторинга окружающей среды.

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

Authors:

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

zhvl@mail.ru

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

margermen@gmail.com

Boris A. Tonkonogov, PhD (engineering), docent; dean of the faculty of environmental monitoring.

boristonkonogov@iseu.by

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

nik.nik1966@tut.by

разработки, системы управления базой данных и программного инструментария (платформ, фреймворков и библиотек), позволяющих выполнить поставленные задачи проектирования и программной реализации; проектирование прототипа Web-платформы представления экологических данных с использованием современных инструментов географических информационных систем; реализация условий для создания пилотного проекта прикладной Web-ориентированной информационно-аналитической системы для совершенствования комплекса радиационной защиты населения и объектов окружающей среды.

Ключевые слова: архитектура; функциональность; модель данных; информационно-аналитическая система; антропогенные и природные факторы; региональные уровни; радиационная защита населения; радиоэкологические риски.

WEB-ORIENTED INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR IMPROVING COMPLEX OF RADIATION PROTECTION OF POPULATION AND ENVIRONMENTAL OBJECTS AT VARIOUS REGIONAL LEVELS

V. V. ZHURAVKOV^a, B. A. TONKONOGOV^a, M. G. GERMENCHUK^a, M. M. TSYBULKA^a

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

Corresponding author: B. A. Tonkonogov (boristonkonogov@iseu.by)

The paper considers the architecture, functionality and data model of a Web-based information and analytical system for improving the complex of radiation protection of the population and environmental objects at different regional levels. The object of the study is the methods, algorithms and technologies for constructing the architecture and optimized relational structure (model) of data consisting of tables that include fields for storing parameters and information about objects and resource potential, a public information and analytical system for a comprehensive study of the influence of anthropogenic and natural factors at various regional levels.

The purpose of the work is to develop the architecture of the information and analytical system and the optimized relational structure (model) of data consisting of tables that include fields for storing parameters and information about objects and resource potential, and to determine the specialized software used in the development of the information and analytical system, including radioecological risks.

Development of the architecture of the information and analytical system: definition of the general architectural style and main architectural solutions; definition and organization of the set of elements and components; definition of the functionality of the software modules of the system; description of the main roles and characteristics of the structural elements and possible types of interactions among them (interfaces); compliance with modular decomposition; endowment with the properties of flexibility, scalability and openness for expansion and implementation of additional functionality. Development of the data structure: definition of the purpose and content of tables; definition of table fields and their types; definition of relationships among tables; implementation of functional database objects that ensure modularity, scalability and portability. Definition of specialized software used in the development of the information and analytical system: selection of an integrated development environment, database management system and software tools (platforms, frameworks and libraries) that allow performing the assigned design and software implementation tasks; design of a prototype Web-platform for presenting environmental data using modern tools of geographic information systems; implementation of conditions for the creation of a pilot project of an applied Web-oriented information and analytical system.

Keywords: architecture; functionality; data model; information and analytical system; anthropogenic and natural factors; regional levels; radiation protection of the population; radioecological risks.

Введение

Деятельность человека постоянно связана с накоплением информации об окружающей среде, ее отбором и хранением. Информационные системы, основное назначение которых – информационное обеспечение пользователя, то есть предоставление ему необходимых сведений по конкретной проблеме или вопросу, помогают человеку решать задачи быстрее и качественнее. При этом одни и те же данные могут использоваться при решении разных задач, в том числе для расчета радиоэкологических рисков¹. Любая информационная система предназначена для решения некоторого класса задач и включает в себя как хранилище данных, так и средства реализации различных процедур, обеспечивающих

¹Государственная программа «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс] // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100066> (дата обращения 17.07.2024)

сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и преобразование пространственно-распределенных данных.

Информационно-аналитические системы рассчитаны, как правило, на установку и подключение большого количества автоматизированных рабочих мест (клиентов), располагающих собственными базами (источниками) данных и средствами ввода / вывода результатов. Специалисты в области радиационной защиты населения и объектов окружающей среды на автоматизированном рабочем месте на основе пространственно-привязанной информации способны решать следующие задачи²:

- анализировать изменения окружающей среды под влиянием природных и техногенных факторов;
- давать заключения о рациональном использовании и охране атмосферных, земельных, водных, минеральных и энергетических ресурсов, снижении ущерба и предотвращении техногенных катастроф;
- разрабатывать рекомендации по совершенствованию комплекса радиационной защиты населения и объектов окружающей среды на разных региональных уровнях и в различных типах ситуаций облучения;

- обеспечивать безопасное проживание людей, охрану их здоровья и т. д.

При оценке ситуаций, связанных с решением задач по совершенствованию системы радиационной защиты населения и объектов окружающей среды, используются расчетные данные по оценке доз облучения на основные компоненты биогеоценоза, а также оценки и прогноз действующих и потенциальных радиоэкологических рисков, поэтому информационная подготовка занимает достаточно много времени, а информационно-аналитические системы в состоянии должны быстро предоставить информацию и обеспечить нахождение эффективных методов регулирования. В условиях возникшей ситуации (ситуации риска) решения не могут быть смоделированы в явном виде, однако основой для их принятия может служить большой объем разнообразной информации, хранимой и передаваемой интегрированной базой данных. По предоставленным результатам управленческий персонал на основе своего опыта и методом экспертного анализа может принять конкретные решения для проведения мероприятий по радиационной защите населения и объектов окружающей среды на различных региональных уровнях.

Разработаны новая архитектура и оптимизированная реляционная структура (модель) данных, состоящая из таблиц, включающих поля для хранения параметров и информации об объектах и ресурсном потенциале, а также факторах, влияющих на степень радиоэкологических рисков RR [1], Web-ориентированной информационно-аналитической системы общего доступа для комплексного изучения влияния антропогенных и природных факторов на различных региональных уровнях, реализующая методы и модели для хранения параметров и информации об объектах и ресурсном потенциале, анализе антропогенных и природных факторов на различных территориальных уровнях, базирующаяся на геоинформационных технологиях. Указанные разработки – основа для создания прикладной Web-ориентированной информационно-аналитической системы общего доступа для комплексного изучения влияния антропогенных и природных факторов на различных региональных уровнях [2].

Разработка указанной системы является актуальной научной и практической задачей, решение которой создаст условия для хранения параметров и информации об объектах, ресурсном потенциале и анализа антропогенных и природных факторов на различных территориальных уровнях с использованием геоинформационных технологий. Это повысит комфортность проживания граждан Республики Беларусь и поспособствует поддержке принятия соответствующих управленческих решений в области освоения и повышения эффективности использования различных видов природных ресурсов и мониторинга состояния компонентов окружающей среды в целях устойчивого развития на территориальных единицах различного уровня. Результаты могут быть использованы в интересах учреждений Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, в частности для комплексного изучения влияния антропогенных и природных факторов на различных региональных уровнях и принятия соответствующих управленческих решений. Сфера и масштабы ожидаемого применения результатов могут быть распространены на всю территорию Республики Беларусь.

Характеристика и назначение разрабатываемой информационно-аналитической системы. Основные возможности, предоставляемые пользователям разрабатываемой информационно-аналитической системы [3]:

- работа с интерактивной электронной картой (манипулирование слоями, перемещение и масштабирование, удаление и добавление объектов и т. д.);
- вывод в заданном виде любых объектов территории и объектов определенного класса с соответствующей атрибутивной информацией о них;

²Государственная программа «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс] // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100099> (дата обращения 17.07.2024).

– обработка информации статистическими методами и отображение результатов такого анализа непосредственным наложением на карту или в другой форме визуализации (таблицы, графические зависимости, гистограммы и т. д.);

– подготовка расчетных данных для проведения мероприятий радиационной защиты населения и объектов окружающей среды в ситуации существующего облучения на основе моделирования радиоэкологических процессов и оценки радиоэкологических рисков.

В рамках разработки архитектуры Web-ориентированной информационно-аналитической системы общего доступа для комплексного изучения влияния антропогенных и природных факторов на различных региональных уровнях определены общий архитектурный стиль и основные архитектурные решения, связанные с организацией совокупности элементов и компонентов, а также функционированием программных модулей системы. Описаны основные роли и характеристики структурных элементов, возможные виды взаимодействий между ними (интерфейсы).

Архитектура разрабатываемой информационно-аналитической системы. Архитектура информационно-аналитической системы предполагает реализацию следующих аспектов [4]:

– технология обработки данных – локальное (централизованное) взаимодействие с интегрированной базой данных, то есть все данные будут храниться на одном сервере под управлением одной системы управления базами данных, а не распределенным образом, так как многие проекты распределенных баз данных характеризуются определенными проблемами в вопросах стандартизации информационных потоков, типов, представления данных и метаданных, а также совместимости отдельных информационных систем и проектов, созданных разными организациями с применением различного программного обеспечения;

– способ доступа к данным – локальный и удаленный (сетевой) доступ с разграничением прав пользователей и поддержкой клиент-серверных технологий.

Следует отметить, что архитектура системы предполагает и модульную декомпозицию. В этой связи целесообразно разделение интерфейсной части системы и части, отвечающей за работу с данными. Тип архитектуры предполагает то, что ее элементы реализуют поддержку объектов специализированной серверной базы данных, работу аналитических функциональных программных модулей, представление и визуализацию данных, а также взаимодействие с удаленными пользователями. В частности, программные модули реализуют методики комплексной оценки и анализа влияния антропогенных и природных факторов с учетом угроз и рисков, последствий природных и антропогенных загрязнителей для организмов и экосистем на различных региональных уровнях, оптимального использования потенциала природных ресурсов и общедоступного мониторинга состояния компонентов окружающей среды, направленные на повышение комфортности проживания граждан и принятия соответствующих управленческих решений.

Архитектуре свойственна гибкость, масштабируемость и открытость для расширения и реализации дополнительной функциональности, в частности разработки специальных алгоритмов и программных модулей взаимодействия с базой данных и графическим Web-ориентированным пользовательским интерфейсом, предоставляющим возможность оптимально, быстро и удобно работать с картографической информацией посредством использования соответствующих технологий и алгоритмов [5]. Это позволит реализовать соответствующие своему специфическому назначению и оптимальные по функциональности клиентскую и серверную части системы. Их основные особенности – возможность поддержки динамически изменяющегося содержимого клиентских Web-страниц без перезагрузки, что значительно сокращает время обновления страниц и ускоряет работу пользователей, реализацию программного пользовательского интерфейса на стороне Web-сервера и создание программного уровня доступа к информации, хранящейся в базе данных, для использования в указанном интерфейсе. Реализация в соответствии с разработанной архитектурой алгоритмов работы аналитических методов и моделей послужит основой для разработки пилотного проекта указанной прикладной системы (рис. 1).

Основные архитектурные компоненты и функциональные программные модули информационно-аналитической системы. Проектирование прототипа информационно-аналитической системы предполагало то, что она будет включать в себя следующие основные архитектурные компоненты и функциональные программные модули (подсистемы):

- 1) разграничение прав пользователей;
- 2) взаимодействие с базой данных;
- 3) сбор и обработка пространственных данных;
- 4) хранение и защита пространственных данных;
- 5) аналитическая обработка данных;
- 6) представление и визуализация данных;
- 7) импорт / экспорт, конвертация и парсинг данных и др.

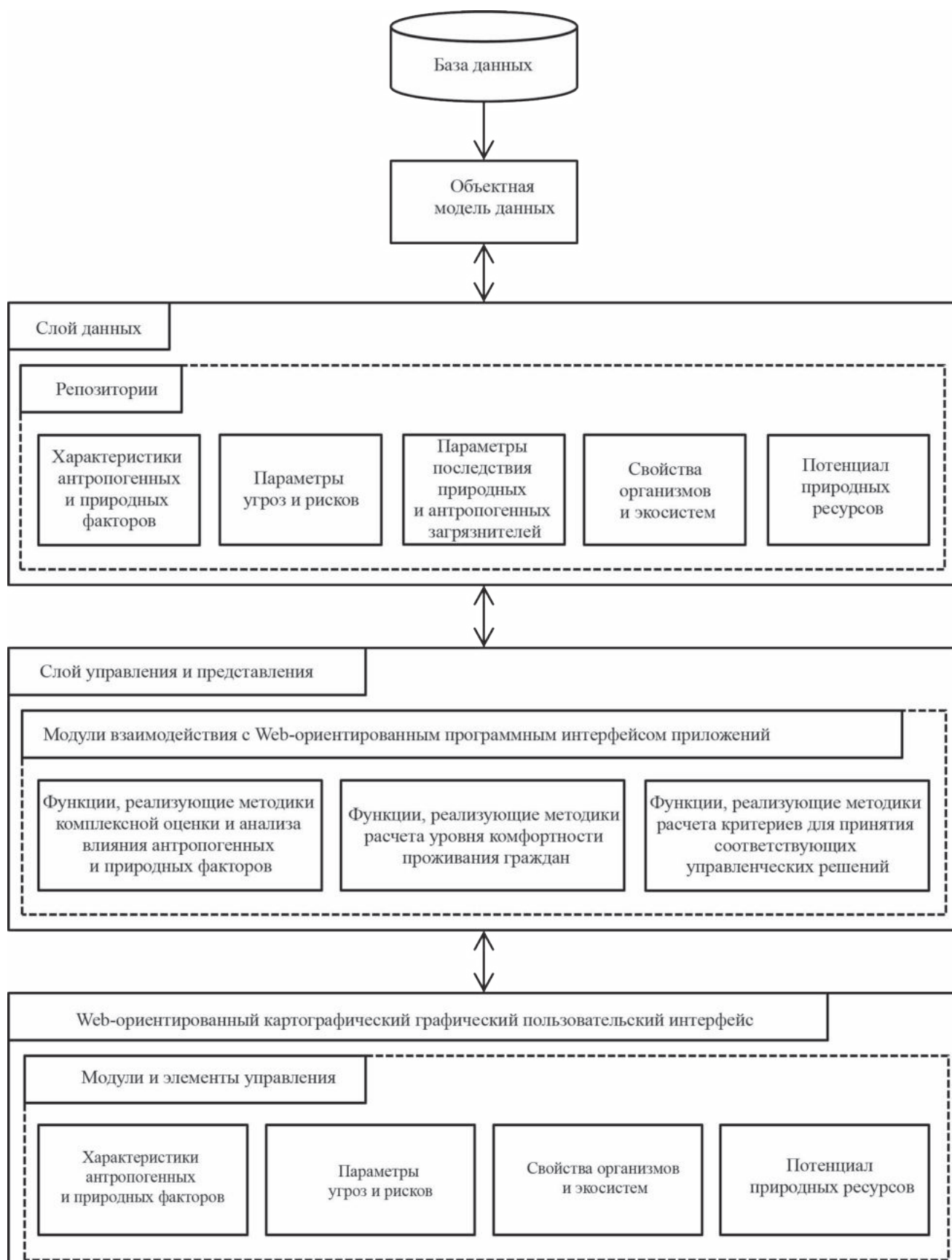


Рис. 1. Общая архитектура Web-ориентированной информационно-аналитической системы

Fig. 1. General architecture of Web-oriented information and analytical system

Указанный набор программного обеспечения на основе полученной информации позволит [6]:

- классифицировать и кластеризовать соответствующие данные для дальнейшего создания различного картографического содержимого в виде различных картографических слоев с визуализацией содержимого разных типов данных;

- реализовать дополнительные сервисы для обработки и представления данных;

- производить аналитические (статистические) вычисления различного рода для дальнейшего использования (в составе картографического содержимого).

Для процессов визуализации и мониторинга экологических последствий (выбросов и сбросов загрязняющих веществ) могут выполняться процедуры компьютерного моделирования (аналитических расчетов) с использованием стационарных (для предприятий) и мобильных (для транспорта) точек. В процессе моделирования необходимо собрать и обработать первичные пространственные данные с учетом определенных атрибутов и параметров, а затем применить к ним определенные технологии программной визуализации:

- данные о стационарных источниках загрязнения, полученные от пунктов различных измерений (мониторинга) выбросов и сбросов загрязняющих веществ предприятиями (визуализация – круги определенного цвета, значения радиусов которых пропорциональны уровню (степени) загрязнения);

- данные о загрязняющих веществах предприятий (визуализация – цветовой градиент (дискретный набор цветов) в соответствии с уровнем (степенью) загрязнения);

- данные ретроспективного анализа и прогнозного моделирования загрязнения территорий Республики Беларусь основными дозообразующими радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС;

- данные с GPS-треков от подвижного транспорта и других мобильных источников загрязнения (визуализация – закрашенные линии (траектории) выбросов цветами в соответствии с уровнем (степенью) загрязнения) и т. д.

В проектируемом программном продукте при автоматизированных расчетах можно также учитывать поправочные коэффициенты, связанные со значениями силы и направления ветра, а также характеристиками рельефа местности. В результате обработки указанных данных получают комплексные данные, на основе которых рассчитывается совокупность выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух и воду как для точечных объектов, так и на определенной территории.

Программный модуль для разграничения прав пользователей используется при санкционированном доступе к информационному ресурсу. Программные механизмы разграничения прав доступа к информационному ресурсу основаны на алгоритмах, принципах авторизации и аутентификации пользователей, администрирования содержимого серверной базы данных и защиты от несанкционированного доступа к этому содержимому.

Таким образом, пользователи в соответствии со своими правами могут формировать различные запросы, выполнять визуализацию данных и производить прочие манипуляции в среде информационного ресурса.

Характеристика и назначение данных разрабатываемой информационно-аналитической системы. В задачи разрабатываемой Web-ориентированной информационно-аналитической системы общего доступа (совершенствование компонентов радиационной защиты населения и объектов окружающей среды в ситуации существующего облучения) на основе моделирования радиэкологических процессов на различных региональных уровнях входят предоставление (визуализация) и анализ (обработка) во времени данных о результатах:

- воздействия человеческой деятельности на живые организмы;

- воздействия на живые организмы через изменение людьми их среды обитания;

- естественного изменения различных качественных и количественных природных величин и характеристик.

Указанные особенности системы направлены на повышение уровня информированности населения о различных аспектах состояния окружающей среды и возможности принятия своевременных управленческих решений на различных региональных (территориальных) уровнях.

В этой связи база данных, входящая в состав разрабатываемой информационно-аналитической системы, должна содержать или иметь возможность манипулировать следующими данными:

- различные географические (природные) объекты;

- результаты наблюдений за состоянием атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, земель и параметров радиационной обстановки;

- результаты радиационного мониторинга окружающей среды, а также локального мониторинга, предоставляемых природопользователями;

- ресурсный потенциал и т. д.

Рассмотрим оптимизированную реляционную структуру (модель) данных разрабатываемой информационно-аналитической системы. По структуре разрабатываемая база данных может быть как реляционного, так и нереляционного типа, что имеет свои достоинства и недостатки. Она состоит из таблиц, включающих поля для хранения различных параметров и информации об объектах и ресурсном потенциале, и в дальнейшем подлежит нормализации и оптимизации.

Возможность анализа изменений данных во времени (ретроспективы) предполагает хранение в указанной базе данных определенной информации (в том числе пространственно-распределенной в соответствии с географическими координатами) в зависимости от времени, либо использование специальных программно реализованных статистических или иных аппроксимирующих математических моделей.

При хранении данных в структуре (модели) базы данных должна быть предусмотрена возможность ответственности их различным региональным уровням (хозяйства, населенные пункты, районы, области и т. д.).

Данные, хранящиеся в проектируемой базе данных, подразделяются на:

- географические – описывают объект путем указания его расположения относительно других географических объектов;
- пространственные – описывают объект путем указания его географических координат (широты и долготы) и другой атрибутивной информации.

Оптимизированная (нормализованная) реляционная структура (модель) данных включает в себя различные объекты базы данных в виде таблиц, содержащие поля с определенными типами данных для хранения параметров и информации о пространственных объектах и ресурсном потенциале, связей (отношений) между этими таблицами и полями.

Разработка функциональных объектов базы данных. Для оценки и анализа влияния антропогенных и природных факторов на различных региональных уровнях в зависимости от пространственного и временного распределения, условий и параметров реализованы такие оригинальные функциональные объекты базы данных, как хранимые процедуры, функции, триггеры и представления.

Другим вариантом реализации таблиц базы данных является их объектная модель, включенная в архитектуру интегрированной информационной системы и представляющая собой набор классов (сущностей), соответствующих определенным таблицам. В этом случае хранимые процедуры могут быть представлены функциями (методами). Репозитории изолируют друг от друга разнородные данные и включают в себя механизмы управления ими, например, функции для реализации выборок, редактирования, удаления и подбора данных для географических объектов, а также различных расчетов.

Web API-контроллеры возвращают и принимают данные в определенном формате. Обработкой и отображением данных занимается клиентское приложение. Используются контроллеры указанного типа, так как картографический интерфейс требует работы без перезагрузки страницы. MVC-контроллеры формируют готовые страницы и возвращают их пользователю.

Для выполнения как аналитических расчетов на основе информации, хранящейся в базе данных, так и предоставления непосредственно самих данных, программный код, выполняющий вышеперечисленные операции, может быть размещен на стороне сервера и на стороне клиента. Учитывая, что создаваемая информационно-аналитическая система – сетевой ресурс, то программный код, оперирующий данными, необходимо разместить как можно ближе к самим обрабатываемым данным, позволяющем избежать пересылки через сеть множества команд и особенно необходимости передачи больших объемов данных с клиента на сервер.

Система управления базами данных предоставляет возможность разместить программный код на стороне сервера в виде хранимых процедур, пользовательских функций, триггеров и представлений, содержащихся в базе данных.

Схема доступа к данным с использованием указанных объектов приведена на рис. 2.

Хранимые процедуры и пользовательские функции – это отдельные программы, написанные на языке SQL, то есть представляющие собой набор SQL-инструкций, который хранится в базе данных. Эти объекты являются частью метаданных базы данных. Они могут получать входные параметры, возвращать значения приложению и быть вызваны явно из Web-приложения или подстановкой вместо имени таблицы в инструкции SELECT. В рамках данного проекта хранимые процедуры и функции обеспечивают следующие возможности:

- модульность – хранимые процедуры могут быть общими для приложений (программных модулей), которые обращаются к той же самой базе данных, что позволяет избежать повторяющегося кода и уменьшает размер приложений;
- упрощение сопровождения приложений – при обновлении процедур, изменения автоматически отражаются во всех приложениях, которые используют их, без необходимости их повторной компиляции и сборки;
- повышение эффективности работы – для удаленных клиентов процедуры выполняются сервером, а не самими клиентами, что снижает сетевой трафик и повышает производительность.

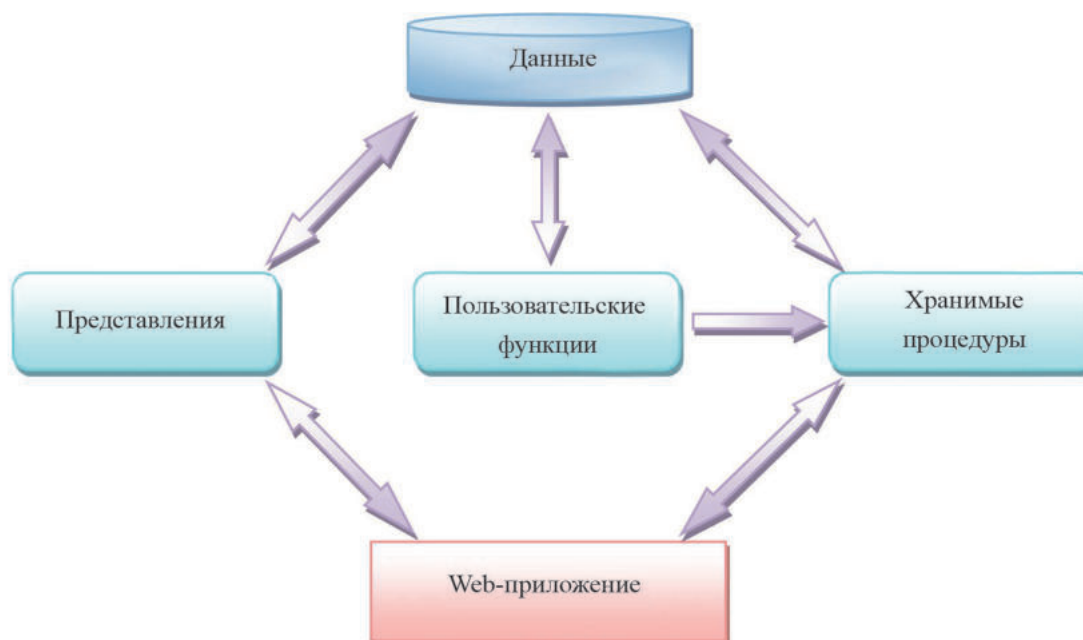


Рис. 2. Схема доступа к данным при помощи хранимых процедур, пользовательских функций и представлений

Fig. 2. Data access diagram using stored procedures, user-defined functions and views

Хранимые процедуры, отличаются от функций тем, что в них допускается использование выходных параметров только целочисленного типа. Использование хранимых процедур позволяет повысить производительность, расширить возможности программирования и поддержать функции безопасности данных.

Как серверные программы, так и хранимые процедуры имеют ряд преимуществ:

- хранение в скомпилированном виде, поэтому выполняются быстрее, чем пакеты или запросы;
- выполнение обработки данных на сервере, а не на рабочей станции, что значительно снижает нагрузку на локальную сеть;
- модульный вид, поэтому их легко внедрять и изменять (если клиентское приложение вызывает хранимую процедуру для выполнения некоторой операции, то модификация процедуры в одном месте влияет на ее выполнение у всех пользователей);
- важный компонент системы безопасности базы данных (если все клиенты осуществляют доступ к данным с помощью хранимых процедур, то прямой доступ к таблицам может быть запрещен, и все действия пользователей будут находиться под контролем).

Наполнение базы данных сводится к заполнению определенных элементов информацией, которая впоследствии пересылается и обрабатывается хранимой процедурой на стороне сервера баз данных. Получив информацию, хранимая процедура проверяет данные на корректность ввода и, если есть нарушения, то возвращает код ошибки (коды ошибок определяются разработчиками системы), если же информация корректна, то данные добавляются в заданную таблицу.

Кроме добавления информации непосредственно в таблицы, хранимые процедуры позволяют производить первичную обработку информации, то есть проводить аналитическую обработку данных. Использование этих объектов позволяет ограничить участие пользователя в различных расчетах, а также скрыть определенные детали работы системы. Пользователю предоставляется уже обработанная информация в виде результатов проведенных расчетов или же при помощи таких графических средств отображения информации, как графики и диаграммы.

Вместо хранения часто используемого запроса, клиенты могут ссылаться на соответствующую хранимую процедуру. При вызове хранимой процедуры ее содержимое сразу же обрабатывается сервером. В создаваемой базе данных хранимые процедуры содержат запросы на получение и изменение данных, инкапсулируют вызов пользовательских функций (ввиду того, что пользовательские функции не могут быть вызваны напрямую из Web-приложения).

Таким образом, при вызове пользовательской функции, необходимо выделить соответствующую хранимую процедуру, инкапсулирующую вызываемую функцию.

Вызов сопровождается получением результирующей таблицы из функции и удалением временных данных из таблицы «Session_FactorType». На основе написанных пользовательских функций создана также хранимая процедура «dbo.all_factors», выполняющая оценку всех значений антропогенных

и природных факторов, хранимых в базе данных. Данная процедура производит поочередный вызов пользовательских функций с передачей в них усредненных параметров, получает результат их работы и предоставляет пользователю среднее значение антропогенных и природных факторов. Таким образом, использование хранимых процедур позволяет не только обеспечить простоту доступа к данным, но и защитить их от несанкционированного доступа.

Пользовательские функции представляют упорядоченное множество операторов, которые заранее оптимизированы, откомпилированы и могут быть вызваны для выполнения работы в виде единого модуля. При использовании пользовательских функций допускается передавать только входные параметры, так как выходные параметры в них не предусмотрены. Отказ от использования выходных параметров компенсируется введением в действие более надежно формируемого возвращаемого значения. Возвращаемое значение может быть скалярным, как и в случае применения системных переменных. Но особенно привлекательным свойством пользовательских функций является то, что тип данных возвращаемого значения не ограничивается только целочисленным типом, как при использовании хранимых процедур. Значения, возвращаемые пользовательской функцией, могут относиться к любому типу данных.

Возможности формирования возвращаемых значений пользовательскими функциями не ограничиваются лишь скалярными значениями, а допускается использовать таблицы в качестве возвращаемых значений. Такая возможность является чрезвычайно удобной для проведения расчетов. Оформление кода в виде пользовательских функций является предпочтительным по многим причинам, однако в данном случае они представляют удобство в том, что функции могут вызываться на выполнение как объекты, непосредственно встроенные в запрос.

Все функции возвращают таблицы с определенным набором полей для различных типов географических объектов. В связи с этим обязательными полями для всех таблиц, формирующихся в результате работы функций, будут являться поля с различными идентификаторами.

Таким образом, результирующие таблицы являются своеобразным дополнением к соответствующим таблицам антропогенных и природных факторов, в которых указывается их влияние в зависимости от введенных пользователем параметров.

Пользовательские функции, возвращающие таблицу, используются в базе данных исключительно для аналитических расчетов. Причем некоторые функции возвращают данные не только конечному пользователю, но и могут передавать их в другие функции (на выбор пользователя) для дальнейших аналитических расчетов. Эти данные используются функцией, которая в зависимости от потребностей пользователя подбирает необходимые параметры.

В основные задачи разработанных функциональных объектов базы данных Web-ориентированной информационно-аналитической системы общего доступа для системы радиационной защиты населения и объектов окружающей среды в ситуации существующего облучения на различных региональных уровнях входят анализ (обработка) во времени данных о результатах:

- воздействия человеческой деятельности на живые организмы;
- воздействия на живые организмы через изменение людьми их среды обитания;
- естественного изменения различных качественных и количественных природных величин и характеристик.

В этой связи база данных, входящая в состав разрабатываемой информационно-аналитической системы, должна содержать или иметь возможность манипулировать следующими данными:

- различные географические (природные) объекты;
- результаты наблюдений за состоянием атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, земель и радиационного фона;
- результаты радиационного мониторинга окружающей среды и локального мониторинга, предоставляемых природопользователями;
- ресурсный потенциал и т. д.

Для проведения различного рода аналитических расчетов функциональные объекты должны взаимодействовать с табличными объектами базы данных:

- географическое положение объектов;
- антропогенные и природные факторы, свойственные объектам;
- материальные и человеческие ресурсы, оборудование и т. д.

Таким образом, созданы специальные хранилища данных с использованием объектно-ориентированной технологии для объектно-реляционного отображения, позволяющей связывать базы данных с концепциями объектно-ориентированных языков программирования с использованием подхода Database First, который позволяет по существующей базе данных сгенерировать модель для подключения к ней.

Проектирование прототипа Web-платформы представления экологических данных. Пример графического пользовательского интерфейса и визуализации прототипа разрабатываемой информационно-аналитической системы с результатами автоматизированного анализа антропогенных и природных факторов с использованием инструментария географических информационных систем и специализированных программных интерфейсов приложений, которые будут использованы в дальнейших разработках, представлен на рис. 3.

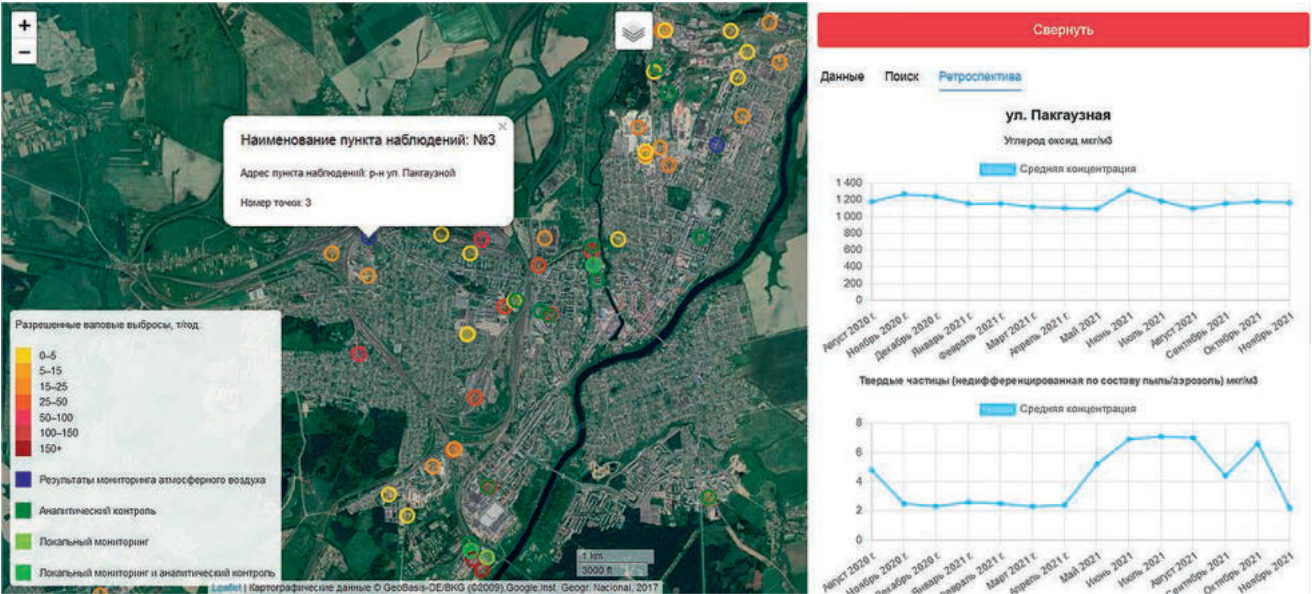


Рис. 3. Пример графического пользовательского интерфейса и визуализации прототипа информационно-аналитической системы

Fig. 3. Example of graphical user interface and visualization of information and analytical system prototype

Разработанная архитектура Web-ориентированной информационно-аналитической системы общего доступа для организации системы защиты населения и объектов окружающей среды при ретроспективном и прогнозном моделировании радиационной обстановки позволяет визуализировать данные о загрязнении территорий Республики Беларусь основными дозообразующими радионуклидами: ^{131}I , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{239}Np , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{144}Ce , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am и др. (рис. 4). На этой основе провести оценки дозовых нагрузок на население, проживающее в наиболее загрязненных районах страны (рис. 5) [9]. Анализ данных рис. 5 определяет области и районы Республики Беларусь, которые в результате аварии на Чернобыльской АЭС подверглись радиоактивному загрязнению, и население, проживающее в южных районах Республики Беларусь. В будущем этому необходимо уделять повышенное внимание при медицинском обследовании [7].

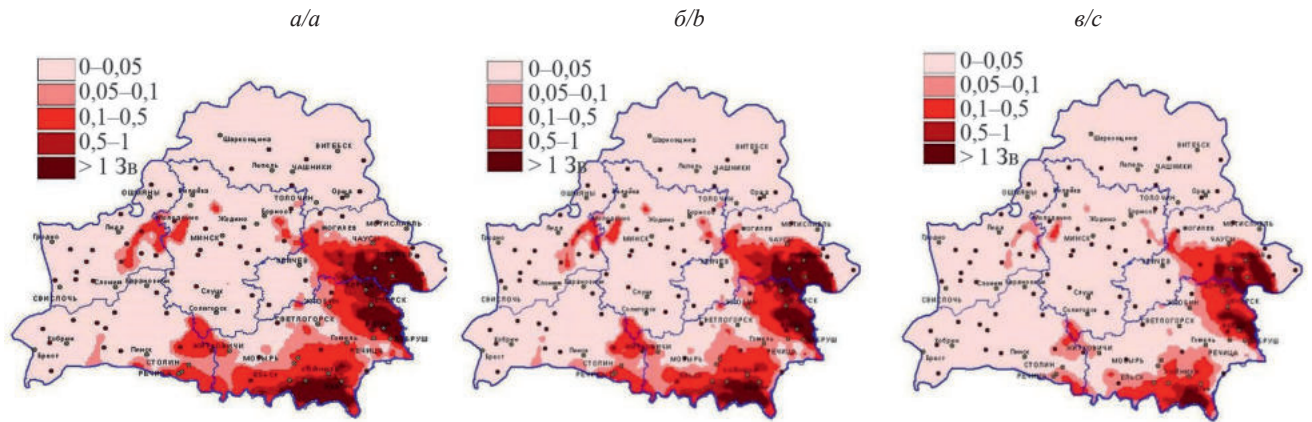


Рис. 5. Среднегрупповая доза на 1986 г.: а) дети до 5 лет; б) подростки от 5 до 17 лет; в) взрослые от 17 лет

Fig. 5. Average group dose for 1986 year:
а) children under 5 years old; б) adolescents from 5 to 17 years old; в) adults from 17 years old

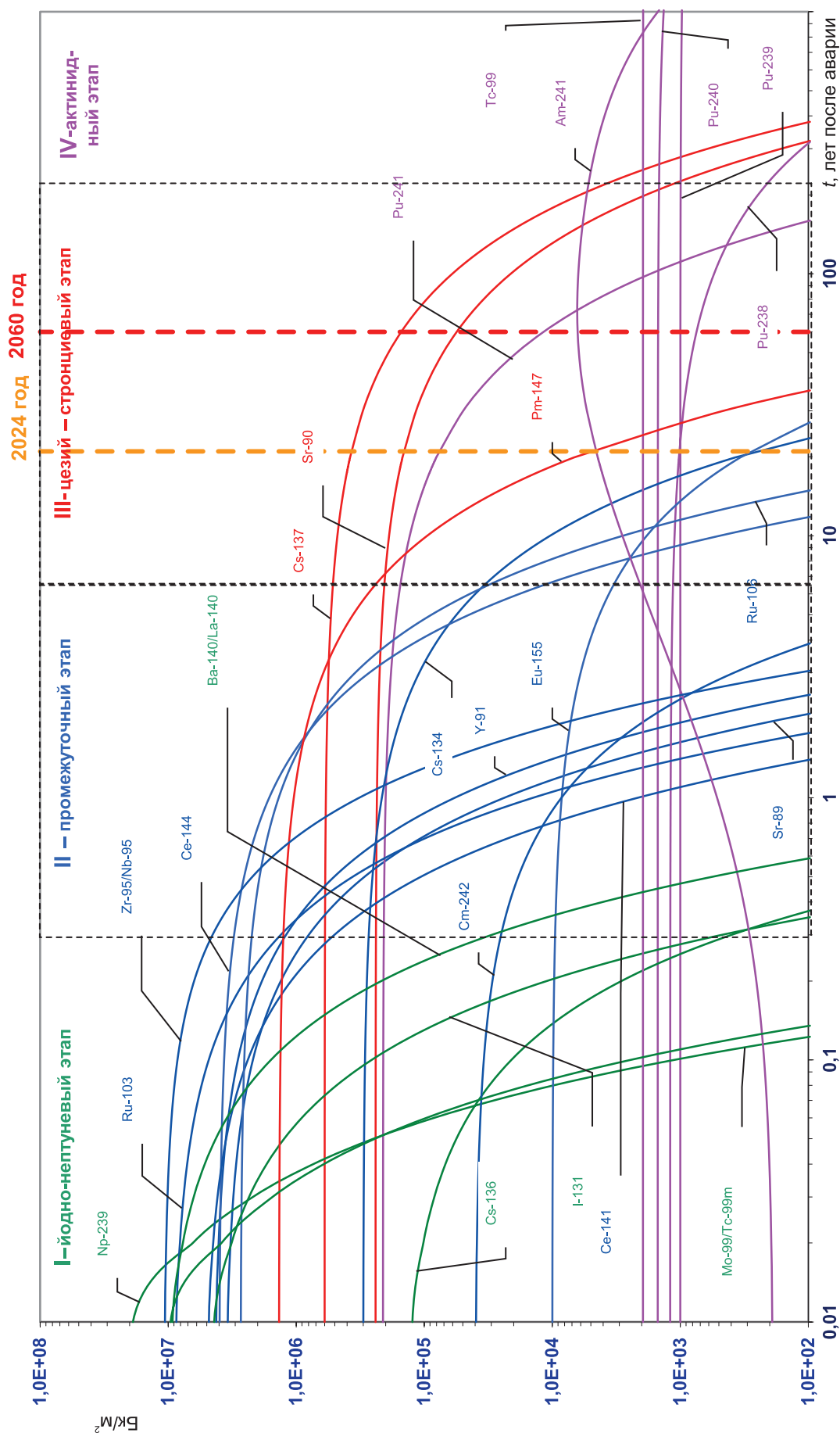


Рис. 4. Динамика радиоактивного загрязнения почвы на реперной площадке «Масаны» на основе экспериментальных данных

Fig. 4. Dynamics of radioactive contamination of soil at reference site «Masany» based on experimental data

Заключение

Таким образом, по результатам исследования авторами:

- 1) разработана архитектура Web-ориентированной информационно-аналитической системы общего доступа для комплексного изучения влияния антропогенных и природных факторов на различных региональных уровнях, реализующая методы, модели для хранения параметров и информации об объектах, ресурсном потенциале, анализа антропогенных и природных факторов на различных территориальных уровнях, базирующаяся на геоинформационных технологиях;
- 2) разработана новая оптимизированная реляционная структура (модель) данных, состоящая из таблиц, включающих поля для хранения параметров и информации об объектах и ресурсном потенциале.
- 3) разработаны новые функциональные объекты базы данных;
- 4) выполнено проектирование прототипа Web-платформы представления экологических данных с использованием современных инструментов географических информационных систем;
- 5) реализованы условия для создания пилотного проекта прикладной Web-ориентированной информационно-аналитической системы общего доступа для комплексного изучения влияния антропогенных и природных факторов на различных региональных уровнях, разных типах ситуаций облучения;
- 6) проведена ретроспективная и прогнозная оценка радиационной обстановки, позволяющая визуализировать данные о загрязнении территорий Республики Беларусь основными дозообразующими радионуклидами, и на этой основе провести оценки дозовых нагрузок на население, проживающего в наиболее загрязненных районах страны, а также степень радиоэкологических рисков RR.

Данная работа подготовлена в рамках выполнения диссертационного исследования по теме «Совершенствование системы радиационной защиты населения и объектов окружающей среды в ситуации существующего облучения на основе моделирования радиоэкологических процессов» Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы, НИР «Разработка Web-ориентированной информационно-аналитической системы общего доступа для комплексного изучения влияния антропогенных и природных факторов на различных региональных уровнях», НИР «Оценить дозовые нагрузки и эффекты ионизирующих излучений в сочетании со стрессом различной природы на биоту в зоне хронического радиационного воздействия».

Библиографические ссылки

1. Герменчук МГ, Цыбулько НН. Основные механизмы управления рисками в сфере радиационной безопасности и мониторинг окружающей среды. *Вестник Брестского государственного технического университета. Геоэкология*. 2024;1(133):160–168. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-133-1-160-168>.
2. Zhuravkov VV. Development of a Web-oriented system for a comprehensive study of the influence of anthropogenic and natural factors on the example of the Orshan region of the Republic of Belarus. В: *Актуальные проблемы науки и техники. Материалы II Международной научно-технической конференции, ФГБОУВО «ИжГТУ им. М. Т. Калашникова», 19–21 мая 2022 г.* Сарапул: [б. и.]; 2022. с. 137–142.
3. Журавков ВВ. Разработка Web-ориентированной системы общего доступа для изучения влияния антропогенных и природных факторов на примере г. Орша Республики Беларусь. В: *Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология – 2022). XVII Международная научно-техническая конференция «3–4 июня 2022; Уфимский государственный авиационный технический университет.* Уфа: [б. и.]; 2022. с. 148–152.
4. Гамма Э, Хелм Р, Джонсон Р, Влиссидес Д. *Паттерны объектно-ориентированного проектирования*. Санкт-Петербург: Питер; 2023. 448 с.
5. Маклафлин Б, Поллайс Г, Уэст Д. *Объектно-ориентированный анализ и проектирование*. Санкт-Петербург: Питер; 2018. 608 с.
6. Фаулер М. *Шаблоны корпоративных приложений*. Москва: Вильямс; 2012. 544 с.
7. Конопля ЕФ, Миронов ВП, Журавков ВВ. *Радиация и Чернобыль: Короткоживущие радионуклиды на территории Беларуси*. Минск: Белорусская наука; 2008. 198 с.

References

1. Germenchuk MG, Basic risk management mechanisms in the field of radiation safety and environmental monitoring. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Geoecology*. 2024;1(133):160–168. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-133-1-160-168>. Russian.
2. Zhuravkov VV Development of a Web-oriented system for a comprehensive study of the influence of anthropogenic and natural factors on the example of the Orshan region of the Republic of Belarus. In: *Actual problems of science and technology. Proceedings of the II International scientific and technical conference, Izhestvo named after M. T. Kalashnikov, 2022 May 19–21.* Sarapul: [publisher unknown]; 2022. p. 137–142. Russian.
3. Zhuravkov VV. *Razrabotka Web-orientirovannoi sistemy obshchego dostupa dlya izucheniya vliyaniya antropogennykh i prirodnkh faktorov na primere g. Orsha Respubliki Belarus* [Development of a Web-oriented public access system for studying the influence

of anthropogenic and natural factors on the example of the city of Orsha of Republic of Belarus]. In: Science, education, production in solving environmental problems (Ecology – 2022). XVII International scientific and technical conference. 2022 June 3–4; Ufa state aviation technical university. Ufa: [publisher unknown]; 2022. p. 148–152. Russian.

4. Gamma E, Helm R, Johnson R, Vlissides D. *Patterny ob'ektno-orientirovannogo proektirovaniya* [Object-oriented design patterns]. Saint Petersburg: Piter; 2023. 448 p. Russian.

5. McLaughlin B, Pollais G, West D. *Ob'ektno-orientirovannyi analiz i proektirovanie* [Object-oriented analysis and design]. Saint Petersburg: Piter; 2018. 608 p. Russian.

6. Fowler M. *Shablony korporativnykh prilozhenii* [Enterprise application patterns]. – Moscow: Williams; 2012. 544 p. Russian.

7. Konoplya EF, Mironov VP, Zhuravkov VV. *Radiatsiya i Chernobyl': Korotkozhivushchie radionuklidy na territorii Belarusi* [Radiation and Chernobyl: Short-lived radionuclides in Belarus]. Minsk: Belarusskaya nauka; 2008. 198 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 19.09.2024.

Received by editorial board 19.09.2024.

УДК 577.352.33:577.359:504.055

КОМБИНИРОВАННОЕ ДЕЙСТВИЕ ДЕКСАМЕТАЗОНА И ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛАЗМАТИЧЕСКИХ МЕМБРАН ТИМОЦИТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЖИВОТНЫХ

И. В. ПУХТЕЕВА¹⁾, Н. В. ГЕРАСИМОВИЧ¹⁾, М. Д. ГИЛЬ¹⁾

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

Исследуются структурные изменения плазматических мембран клеток иммунной системы при комбинированном действии дексаметазона и перекиси водорода. С помощью флуоресцентного зонда пирена (Sigma) проводилось изучение липидной фазы мембран, а для рассмотрения влияния глюкокортикоидов на клетки тимуса к суспензии клеток добавляли синтетический аналог глюкокортикоидных гормонов дексаметазон в различных концентрациях. Окислительный стресс моделировали путем инкубации суспензии тимоцитов с пероксидом водорода. Установлено, что дексаметазон, взаимодействуя с мембранами тимоцитов, вызывает изменение физико-химических характеристик плазматических мембран клеток тимуса. Наиболее выраженные изменения наблюдались в области аннулярных липидов, микровязкость в этой области увеличивалась в 1,5–2 раза в зависимости от времени инкубации и концентрации дексаметазона. Экзогенное воздействие перекиси водорода на клетки тимуса приводит к таким изменениям в структурном состоянии плазматических мембран тимоцитов, как увеличение полярности в 1,3 раза, микровязкости в области аннулярных липидов в 2 раза и липидного бислоя в 1,7 раза, а также повышение

Образец цитирования:

Пухтеева ИВ, Герасимович НВ, Гиль МД. Комбинированное действие дексаметазона и перекиси водорода на структурное состояние плазматических мембран тимоцитов экспериментальных животных. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;4:74–84.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-74-84>

For citation:

Puhteeva IV, Gerasimovich NV, Gil MD. The combined effect of dexamethasone and hydrogen peroxide on the structural state of the plasma membranes of thymocytes of experimental animals. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;4:74–84. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-74-84>

Авторы:

Ирина Викторовна Пухтеева – старший преподаватель кафедры экологической медицины и радиобиологии.
Наталья Васильевна Герасимович – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры экологической медицины и радиобиологии.
Маргарита Дмитриевна Гиль – магистрант факультета экологической медицины.

Authors:

Irina V. Puhteeva, senior lecturer at the department of environmental medicine and radiobiology.
puhteeva@mail.ru
Natalya V. Gerasimovich, PhD (biology), docent; associate professor at the department of environmental medicine and radiobiology.
nvgerasimovich@mail.ru
Margarita D. Gil, master's student, faculty of environmental medicine.
margopear@mail.ru

степени тушения белковой флуоресценции в 2 раза. Эти результаты свидетельствуют об активации процессов перекисного окисления липидов, вызванных воздействием пероксида водорода на клетки, что указывает на его влияние на изменение структурного состояния плазматических мембран тимоцитов. Необходимо отметить, что уменьшение показателей микровязкости липидного бислоя в данных опытах наблюдалось вследствие мембранопосредованного действия перекиси водорода, поскольку данное вещество активирует процессы перекисного окисления липидов. Таким образом, комбинированное действие перекиси водорода и дексаметазона приводит к следующим изменениям: увеличение полярности аннулярных липидов и микровязкости аннулярного липида, уменьшение микровязкости липидного бислоя, а также снижение степени тушения белковой флуоресценции. Минимальные и максимальные концентрации данных веществ имеют различный эффект на указанные параметры, что может быть обусловлено сложным взаимодействием между перекисью водорода и дексаметазона.

Ключевые слова: дексаметазон; окислительный стресс; плазматическая мембрана; тимоциты; пирен.

THE COMBINED EFFECT OF DEXAMETHASONE AND HYDROGEN PEROXIDE ON THE STRUCTURAL STATE OF THE PLASMA MEMBRANES OF THYMOCYTES OF EXPERIMENTAL ANIMALS

I. V. PUHTEEVA^a, N. V. GERASIMOVICH^a, M. D. GIL^a

*^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: I. V. Puhteeva (puhteeva@mail.ru)*

The aim of the work is to study structural changes in the plasma membranes of cells of the immune system under the combined action of dexamethasone and hydrogen peroxide. Using a pyrene fluorescent probe (Sigma), the lipid phase of membranes was studied. To study the effect of glucocorticoids on thymocytes, a synthetic analogue of the glucocorticoid dexamethasone was added to the cell suspension in various concentrations. Oxidative stress was simulated by incubation of a suspension of thymocytes with hydrogen peroxide. The work found that glucocorticoids, interacting with thymocyte membranes, cause a change in the physicochemical characteristics of the plasma membranes of thymus cells. The most pronounced changes were observed in the area of annular lipids, the microviscosity in this area increased by 1.5–2 times depending on the incubation time and dexamethasone concentration. The exogenous effect of hydrogen peroxide on thymocytes leads to changes in the structural state of thymocyte plasma membranes, such as a 1.3-fold increase in polarity, a 2-fold increase in microviscosity in the area of annular lipids and a 1.7-fold increase in the lipid bilayer, as well as a 2-fold increase in the degree of protein fluorescence quenching. These results indicate the activation of lipid peroxidation processes caused by the effect of hydrogen peroxide on cells, which indicates the effect of hydrogen peroxide on changes in the structural state of thymocyte plasma membranes. It should be noted that a decrease in the microviscosity of the lipid bilayer in these experiments was observed as a result of the membrane-mediated action of hydrogen peroxide, since this substance activates the processes of lipid peroxidation. Thus, the combined action of hydrogen peroxide and dexamethasone leads to such changes as: an increase in the polarity of annular lipids and the microviscosity of annular lipids, a decrease in the microviscosity of the lipid bilayer, as well as a decrease in the degree of attenuation of protein fluorescence. The minimum and maximum concentrations of these substances have a different effect on these parameters, which may be due to the complex interaction between hydrogen peroxide and dexamethasone.

Keywords: dexamethasone; oxidative stress; plasmatic membrane; thymocytes; pyrene.

Введение

Глюкокортикоиды – это группа гормонов надпочечников, которые образуются из холестерина и высвобождаются в стрессовой ситуации. При высвобождении они связываются с кортикостероидсвязывающим глобулином (КСГ), что делает их доступными для использования на системном или тканевом уровне. Их функция осуществляется путем внутриклеточного связывания с глюкокортикоидным рецептором (ГР) NR3C1. Это так называемый классический механизм передачи сигнала посредством глюкокортикоидов, который включает транскрипционную регуляцию. Таким образом, многие важные действия ГР заключаются в модуляции транскрипции генов посредством ряда различных и взаимодополняющих механизмов. Гены-мишени включают большинство таких медиаторов воспаления, как хемокины, цитокины, факторы роста и их рецепторы [1].

В настоящее время установлены относительно быстрые эффекты глюкокортикоидов, которые реализуются через мембранные рецепторы и не связаны с геномной регуляцией действия стероидов [2]. Хотя название «глюкокортикоиды» происходит от их влияния на уровень глюкозы в плазме крови, они также

участвуют в катаболическом метаболизме, воспалительном и иммунном ответе и других физиологических функциях.

Основными глюкокортикоидами, участвующими в реакции на стресс, являются кортизол, кортизон и кортикостерон. Их концентрация позволяет классифицировать виды животных как кортизол-доминантные (большинство млекопитающих) или кортикостерон-доминантные (например, крысы, мыши, птицы или рептилии) [3].

Глюкокортикоиды влияют на широкий спектр метаболических, противовоспалительных, иммуносупрессивных и когнитивных сигнальных процессов, играя важную роль в гомеостазе и сохранении нормальной функции органов. Синтез регулируется гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой (ГПА) осью, основным глюкокортикоидом которой у человека является кортизол. Синтетические глюкокортикоиды – важные фармакологические агенты, которые усиливают противовоспалительные и иммуносупрессивные свойства эндогенного кортизола. Гомеостатическая активность кортизола нарушается при приеме синтетических глюкокортикоидов, поэтому существует интерес к разработке вариантов лечения, которые минимизируют нарушение оси ГПА, сохраняя при этом фармакологические эффекты. Исследования свидетельствуют, что оптимизация времени введения препарата может достичь этой цели [4].

Окислительный стресс возникает, когда баланс между образованием активных форм кислорода (АФК) и детоксикацией способствует увеличению его уровней, что приводит к нарушению клеточной функции. АФК вызывают повреждение клеточных макромолекул, вызывая перекисное окисление липидов, изменения нуклеиновых кислот и белков [5]. Окислительная дегградация липидов дает малоновой диальдегид и 4-гидроксиноненаль, а также изопростаны из ненасыщенных жирных кислот. Повреждение белка может произойти в результате окисления тиолов, карбонилирования, окисления боковой цепи, фрагментации, разворачивания и неправильного сворачивания, что приводит к потере активности. 8-гидроксидезокси-гуанозин является показателем повреждения ДНК [6]. Чтобы поддерживать правильную передачу сигналов в клетках, вполне вероятно, что ряд ферментов, поглощающих радикалы, поддерживают пороговый уровень АФК внутри клетки. Однако, когда уровень АФК превышает этот порог, увеличение его производства может привести к избыточным сигналам в клетку, а также к прямому повреждению ключевых компонентов сигнальных путей. АФК могут необратимо повреждать важные макромолекулы. Связанный с мембраной белковый тиол и небелковый тиол являются основными цитозольными низкомолекулярными сульфгидрильными соединениями, которые действуют как клеточный восстановитель и защитный реагент от многочисленных токсичных веществ, включая большинство неорганических загрязнителей, через группу $-SH$. Следовательно, тиол часто является первой линией защиты от окислительного стресса. Было обнаружено, что флавоноиды играют важную роль в неферментативной защите от окислительного стресса, особенно в случае рака. Они широко встречаются в чае, фруктах, красном вине, овощах и какао. Флавоноиды, включая флавоны, флаваноны, флавонолы и изофлавоны, представляют собой полифенольные соединения, которые широко распространены в пищевых продуктах и напитках и обладают широким спектром биологической активности, антиоксидантная активность которых широко изучена [5]. Определено понятие антиоксиданта, а также рассмотрены существующие классификационные критерии: первичные антиоксиданты в основном являются прерывателями цепей, способными удалять радикалы путем донорства водорода; вторичные антиоксиданты – это тушители синглетного кислорода, разлагатели пероксидов, хелаторы металлов, ингибиторы окислительных ферментов или поглотители УФ-излучения [6]. Таким образом, окислительный стресс вызывает необратимые повреждения клеточных макромолекул, что приводит к инициации таких заболеваний, как атеросклероз, ишемическая болезнь сердца, заболевания печени, диабет, а также к инициации канцерогенеза. Антиоксиданты подавляют выработку активных форм кислорода и удаление свободных радикалов [5].

Термин «окислительный стресс» используется для обозначения «чрезмерного» образования активных форм кислорода в клетке. Такое повышение концентрации может быть вызвано активацией систем генераций активных форм кислорода (АФК) или снижением активности антиоксидантной системы. В литературе описано множество заболеваний, при которых окислительный стресс наблюдается на начальных стадиях или имеет место в течение всего периода протекания заболевания. Важнейшими АФК считаются супероксидный радикал, синглетный кислород, гидроксильный и пероксидный радикалы, перекись водорода, пероксидный ион, гипохлорит ион [7].

К генерации перекиси водорода в клетке способны митохондрии, микросомы, пероксисомы и цитоплазматические ферменты. В последнее время в литературе появилось много данных о митохондриальных ферментах, способных генерировать АФК. Однако основную роль в этом процессе в митохондриях отводят ферментам дыхательной цепи. Генерация перекиси водорода чувствительна к состоянию дыхательной цепи. Если в митохондриях присутствуют субстраты окисления, кислород и аденозиндифосфат (АДФ), дыхание активируется, так как электрохимический градиент постоянно тратится на

образование АТФ. При этом генерация перекиси не происходит. Когда АДФ исчерпывается, дыхание замедляется, уровень восстановленности никотинамидадениндинуклеотида увеличивается и происходит генерация H_2O_2 [8]. В работе акцентируется внимание на исследовании структурных изменений плазматических мембран клеток иммунной системы при комбинированном действии дексаметазона и перекиси водорода.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования выступали тимоциты крыс. Выделение тимоцитов проводили по методу, как описано в работе [9]. С помощью флуоресцентного зонда пирена (Sigma) проводили исследование липидной фазы мембран. В данном случае анализировалась степень эксимеризации пирена, эффективность тушения пиреном триптофановой флуоресценции, полярность окружения зонда в прикелковом липиде и липидном бислое мембран. Внедрение зонда осуществляли, как описано в работе [10], путем прединкубации его спиртового раствора с суспензией клеток (10^6 кл/мл), находящихся в фосфатном буфере (рН 7,4). Конечная концентрация зонда в среде инкубации составляла 4 мкм/л. Регистрацию спектров флуоресценции осуществляли на спектрофлуориметре СМ 2203 при длинах волн возбуждения 337 и 286 нм (рис. 1).

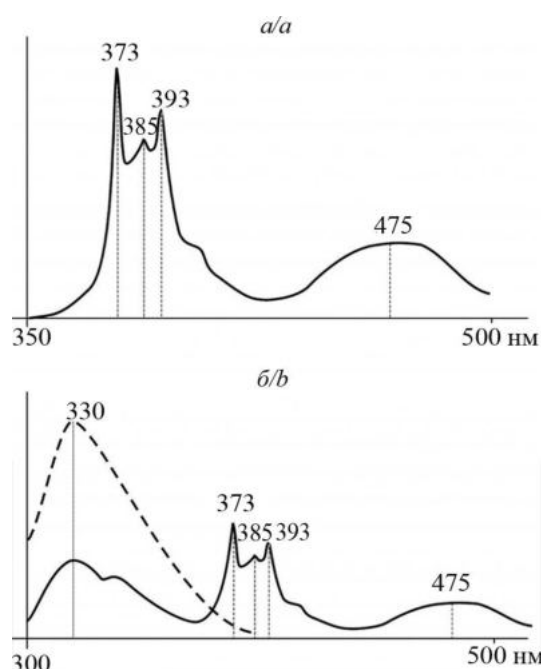


Рис. 1. Спектр флуоресценции пирена при $\lambda_{\text{воз}}=337$ нм (а) и $\lambda_{\text{воз}}=286$ нм (б); 373, 385, 393 нм – максимум вибрационных пиков мономерной эмиссии пирена; 475 нм – максимум вибрационных пиков эксимерной эмиссии пирена; 330 нм – максимум собственной триптофановой флуоресценции (до - - - и после — тушения)

Fig. 1. The fluorescence spectrum of pyrene at $\lambda_{\text{ext}}=337$ nm (a) and $\lambda_{\text{ext}}=286$ nm (b); 373, 385, 393 nm is the maximum vibrational peaks of the monomeric emission of pyrene; 475 nm is the maximum of vibrational peaks of the excimer emission of pyrene; 330 nm is the maximum of intrinsic tryptophan fluorescence (before - - - and after — intrinsic)

Показатели полярности и микровязкости общего липидного бислоя рассчитывали при длине волны возбуждения 337 нм по следующим формулам [10]:

- полярность общего липидного бислоя при $\lambda_{\text{воз}}=337$ нм I_{385} / I_{373} ;
- микровязкость общего липидного бислоя при $\lambda_{\text{воз}}=337$ нм I_{475} / I_{373} ;

Вышеуказанные показатели для области аннулярных липидов рассчитаны по следующим формулам [10]:

- полярность аннулярного липида при $\lambda_{\text{воз}}=286$ нм I_{385} / I_{373} ;
- микровязкость аннулярного липида при $\lambda_{\text{воз}}=286$ нм I_{475} / I_{373} .

Степень тушения белковой (триптофановой) флуоресценции пиреном рассчитывали следующим образом:

$$\text{Степень тушения} = 1 - \frac{I_{330}^{286} (+ \text{ пирен})}{I_{330}^{286} (- \text{ пирен})}.$$

Для исследования влияния глюкокортикоидов на клетки тимуса к суспензии клеток добавляли синтетический аналог глюкокортикоидных гормонов дексаметазон в концентрациях 0,5, 1 и 2 мкМ. Время инкубации суспензии клеток с раствором глюкокортикоида составляло 0, 15, 30, 60 мин, процедура проводилась

при 37 °С. Через указанные промежутки времени производили оценку выживаемости клеток тимуса, а также состояние плазматических мембран клеток.

Окислительный стресс моделировали следующим образом: H_2O_2 добавляли к суспензии тимоцитов в концентрациях 5 нМ и 5 мкМ. Определение процента погибших клеток, а также регистрация изменений структурного состояния плазматических мембран проводились через каждые 15 мин в течение часа инкубации.

Для моделирования комбинированного действия препаратов осуществляли следующие операции: клетки предварительно инкубировали с дексаметазоном в течение 30 мин, затем добавляли перекись водорода в концентрациях и инкубировали в течение 30 мин. В конце производили отмывку суспензии клеток от действующих веществ и оценивали состояние плазматических мембран.

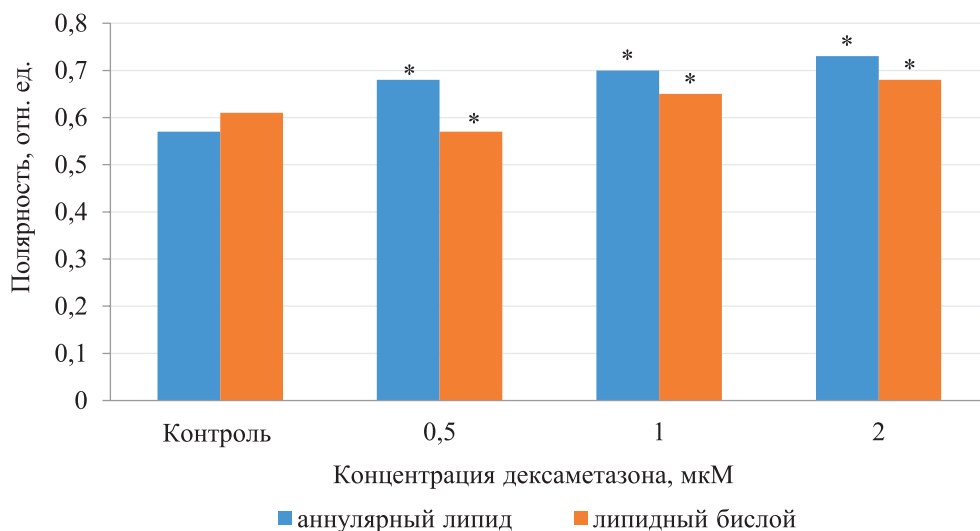
Методы оценки. Результаты экспериментов выражали в виде среднего значения и стандартной ошибки среднего, а достоверность различий в группах оценивали по *t*-критерию Стьюдента. При этом различия считали достоверными при $p \leq 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

В работе проанализировано влияние синтетического аналога глюкокортикоидных гормонов дексаметазона на состояние липидного компонента мембран тимоцитов крыс. Для того оценивались такие показатели, как микровязкость, полярность и степень тушения белковой флуоресценции.

Как следует из представленных данных, полярность аннулярных липидов увеличивалась при всех тестируемых концентрациях дексаметазона, при этом наблюдалась тенденция к увеличению данного показателя в зависимости от концентрации дексаметазона в среде инкубации. При самой низкой концентрации (0,5 мкМ) полярность аннулярных липидов увеличилась на 19 % по сравнению с контролем. При увеличении концентрации вдвое данная величина возрастала на 22 %. Когда концентрация дексаметазона в среде инкубации составила 2 мкМ, полярность аннулярного липида увеличилась на 28 % по сравнению с контролем (рис. 2).

Изменения полярности липидного бислоя носили иной характер. При концентрации дексаметазона 0,5 мкмоль/л этот показатель незначительно снижался (на 7 % от контрольной величины). При концентрации вещества 1 мкМ величина полярности липидного бислоя увеличилась на 7 %, а при 2 мкМ увеличение данного показателя достигло 11 % по сравнению с контролем.



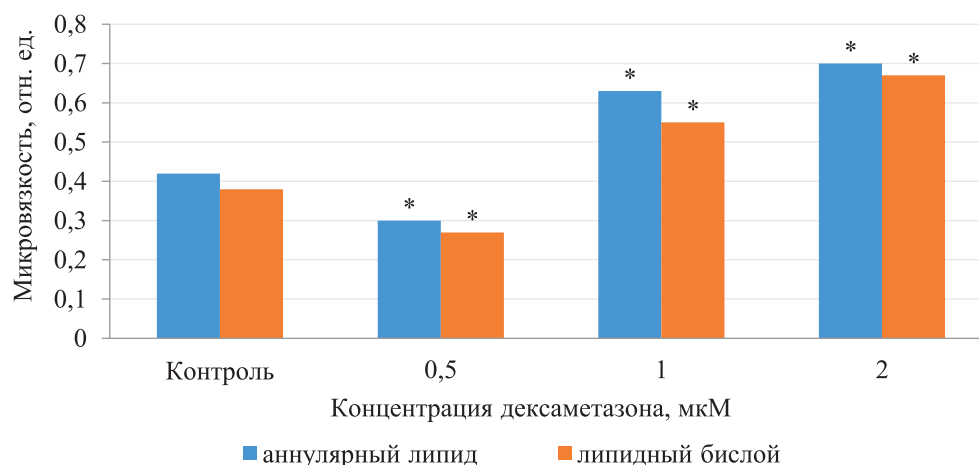
*Отличия от контроля достоверны, $p \leq 0,05$.

Рис. 2. Изменение полярности плазматических мембран тимоцитов при действии дексаметазона

Fig. 2. Change in the polarity of thymocyte plasma membranes under the action of the dexamethasone

На рис. 3 показана динамика изменения микровязкости аннулярного липида при действии дексаметазона. В контроле данный показатель составлял $0,42 \pm 0,05$ отн. ед. При действии дексаметазона в концентрации 0,5 мкМ микровязкость снизилась на 29 % от контрольной величины. В случае воздействия дексаметазона в концентрации 1 мкМ/л обнаружено увеличение показателя в 1,5 раза, а при действии дексаметазона в концентрации 2 мкМ – на 66 %.

Характер изменения показателя микровязкости липидного бислоя был примерно таким же: при действии дексаметазона в концентрации 0,5 мкМ/л обнаружено снижение на 29 %, при действии концентрации 1 мкМ/л – увеличение на 44 %, при концентрации дексаметазона 2 мкМ/л – увеличение на 76 %.

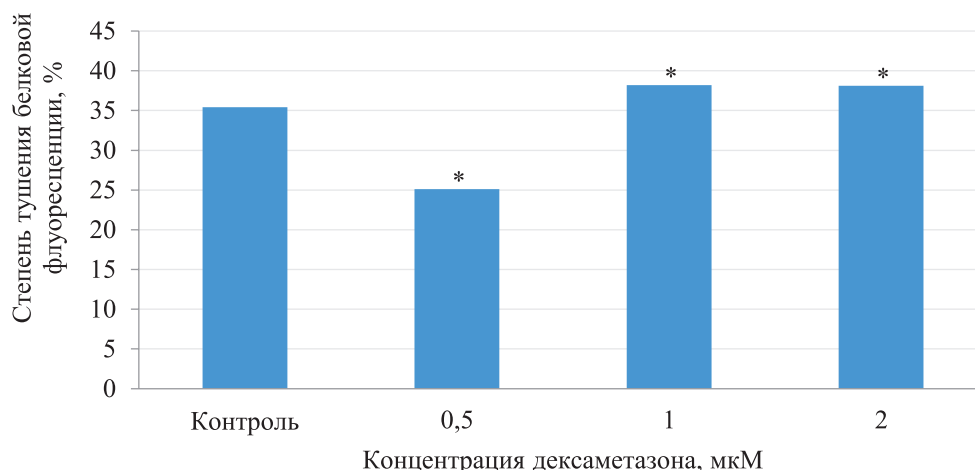


*Отличия от контроля достоверны, $p \leq 0,05$.

Рис. 3. Изменение микровязкости плазматических мембран тимоцитов при действии дексаметазона

Fig. 3. Changes in the microviscosity of thymocyte plasma membranes under the action of the dexamethasone

Степень тушения белковой флуоресценции, которая представлена на рис. 4, изменялась незначительно в зависимости от концентрации дексаметазона в отличие от показателей микровязкости и полярности мембраны.



*Отличия от контроля достоверны, $p \leq 0,05$.

Рис. 4. Изменение степени тушения белковой флуоресценции плазматических мембран тимоцитов при действии дексаметазона

Fig. 4. Changes in the degree of quenching of protein fluorescence of thymocyte plasma membranes under the action of the dexamethasone

Данные, которые получены при действии дексаметазона в концентрации 1 мкМ и 2 мкМ, указывают на то, что степень тушения триптофановой флуоресценции пиреном увеличилась незначительно, примерно на 8 %. При действии самой низкой концентрации дексаметазона степень тушения белковой флуоресценции снизилась на 29 % по отношению к контрольным значениям. Следующая серия экспериментов была направлена на изучение влияния оксидативного стресса на тимоциты.

Изучение влияния минимальной концентрации H_2O_2 (5 нМ) на изменение структурного состояния плазматических мембран тимоцитов показало, что через 30 мин после начала инкубации происходит увеличение показателей микровязкости не более чем на 10 % по отношению к контролю (табл.1). Показатели полярности в этом случае были выше контрольных значений в 1,3 раза. Степень тушения белковой флуоресценции увеличилась на 17 %. Анализ данных показателей в случае действия перекиси водорода в концентрации 5 мкМ свидетельствует, что наиболее существенные изменения регистрируются для показателей микровязкости. Этот показатель в области аннулярных липидов увеличился в 2 раза по отношению к контролю, а в области липидного бислоя – в 1,7 раза. Значения показателей полярности возросли на 25 %, а степень тушения белковой флуоресценции была выше в 2 раза по отношению к контролю.

Таблица 1

Влияние различных концентраций перекиси водорода на физико-химические характеристики структурного состояния плазматических мембран тимоцитов крыс

Table 1

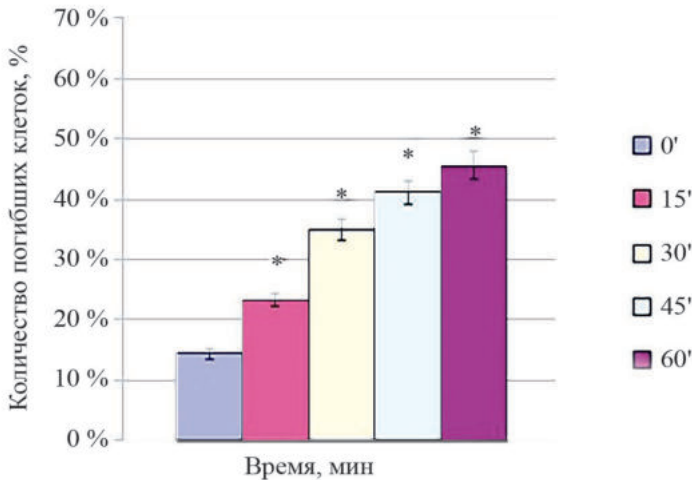
Effect of different concentrations of hydrogen peroxide on the physicochemical characteristics of the structural state of plasma membranes of rat thymocytes

Условия	Полярность		Микровязкость		Степень тушения белковой флуоресценции, %
	аннулярного липида	липидного бислоя	аннулярного липида	липидного бислоя	
Контроль	0,59 ± 0,03	0,62 ± 0,04	0,28 ± 0,03	0,37 ± 0,02	37 ± 1,6
5 нМ H ₂ O ₂ , 30 мин	0,72 ± 0,03*	0,70 ± 0,02	0,42 ± 0,02*	0,50 ± 0,04*	40 ± 1,7*
5 мкМ H ₂ O ₂ , 30 мин	0,80 ± 0,03*	0,78 ± 0,03*	0,51 ± 0,02*	0,65 ± 0,03*	62 ± 2*

*Отличия от контроля достоверны при $p \leq 0,05$.

Данные результаты доказывают тот факт, что при воздействии экзогенной перекиси водорода на клетки тимуса происходит активация процессов перекисного окисления липидов, в результате чего изменяются показатели в области липидного бислоя и аннулярных липидов [11].

На рис. 5 представлена временная зависимость числа погибших тимоцитов крыс при добавлении к ним минимальной концентрации перекиси водорода, то есть оценена цитотоксичность данного вещества.



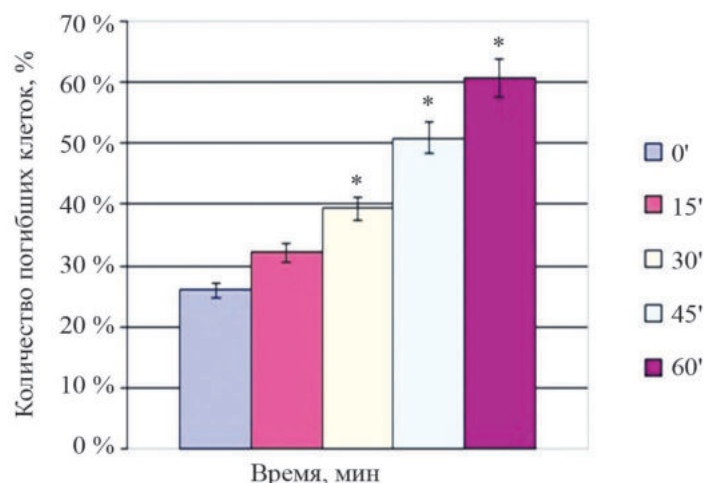
*Отличия от контроля достоверны, $p \leq 0,05$.

Рис. 5. Временная зависимость числа погибших клеток тимуса, обработанных перекисью водорода в конечной концентрации 5 нМ

Fig. 5. Time dependence the number of dead thymic cells treated with hydrogen peroxide at a final concentration of 5 nM

В данном случае замечено увеличение числа погибших клеток: если в начальный момент времени оно составляло 14 %, то после часа инкубации оно было почти в четыре раза больше. Более выраженный эффект воздействия перекиси водорода на тимоциты наблюдался при использовании максимальной концентрации данного агента, что представлено на рис. 6. При этом наблюдается стойкое увеличение количества окрашенных тимоцитов. Если непосредственно после внесения перекиси водорода зарегистрировано значение 26 %, то через 30 мин инкубации оно составляло 40 %, а при 60 – более 60 %.

Наибольший интерес представляют результаты, полученные при комбинированном действии дексаметазона (предварительная инкубация в течение 30 мин) и перекиси водорода (инкубация в течение 30 мин) в максимальных концентрациях (10^{-6} и $5 \cdot 10^{-6}$ моль/л соответственно). Так, при непосредственном добавлении данных экзогенных веществ было зарегистрировано около 25 % погибших клеток, а через 30 мин инкубации их было обнаружено около 40 %. Таким образом, данные эксперименты подтверждают, что сочетанное действие максимальных концентраций оказывает наиболее губительное действие на тимоциты крыс.



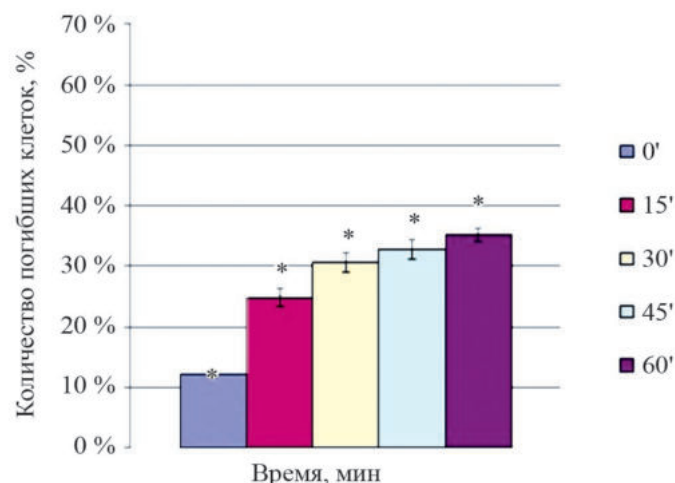
*Отличия от контроля достоверны, $p \leq 0,05$.

Рис. 6. Динамика временной зависимости количества погибших клеток при их инкубации с перекисью водорода в конечной концентрации 5 мкМ

Fig. 6. Dynamics of time dependence of the number of dead cells during their incubation with hydrogen peroxide at a final concentration of 5·µM

В случае использования минимальных концентраций данных экзогенных агентов число погибших клеток не превышало 35 % в течение всего времени инкубации. В данном эксперименте было отмечено значительное увеличение процента погибших клеток уже через 15 мин инкубации. Однако после получаса инкубации количество мертвых клеток увеличивалось на 2–3 % в течение каждые 15 мин последующей инкубации, что можно объяснить включением адаптационных механизмов.

При сочетанном воздействии максимальной концентрации дексаметазона и минимальной концентрации перекиси водорода установлено, что происходит увеличение числа погибших клеток с течением времени. Так, при непосредственном внесении веществ в среду инкубации было зарегистрировано около 15 % погибших тимоцитов, а при 30 мин инкубации их количество составляло уже 35 %. Далее наблюдалось постепенное увеличение процента погибших, а после часа инкубации было обнаружено более 40 % окрашенных клеток. Результаты по изучению сочетанного действия минимальной концентрации дексаметазона и максимальной концентрации перекиси водорода представлены на рис. 7.



*Отличия от контроля достоверны, $p \leq 0,05$.

Рис. 7. Сочетанное влияние минимальной концентрации дексаметазона и максимальной концентрации перекиси водорода на число погибших клеток тимуса с течением времени

Fig. 7. Combined effect of minimum dexamethasone concentration and maximum hydrogen peroxide concentration of the number of dead thymus cells over time

В данном случае также наблюдается увеличение количества погибших тимоцитов, но в меньшей степени. Так, максимальное число мертвых клеток было зарегистрировано после часа инкубации с данными агентами – 37 %. Необходимо отметить, что значительное увеличение количества погибших клеток наблюдалось лишь в течении 30 мин после начала инкубации. Далее данный показатель увеличивался на 1–2 % каждые 15 мин, что также можно объяснить включением антиоксидантных и адаптационных механизмов.

Далее проводилась серия экспериментов, направленная на изучение сочетанного влияния данных экзогенных агентов на физико-химические характеристики структурного состояния мембран тимоцитов с прединкубацией дексаметазоном в течении 30 мин. Результаты данного исследования приведены в табл. 2.

Таблица 2

Комбинированное влияние различных концентраций дексаметазона и перекиси водорода на физико-химические характеристики структурного состояния плазматических мембран тимоцитов крыс (прединкубация дексаметазоном в течение 30 мин)

Table 2

Combined effect of different concentrations of dexamethasone and hydrogen peroxide on the physicochemical characteristics of the structural state of plasma membranes of rat thymocytes (preincubation with dexamethasone for 30 minutes)

Условия	Полярность		Микровязкость		Степень тушения белковой флуоресценции, %
	аннулярного липида	липидного бислоя	аннулярного липида	липидного бислоя	
Контроль	0,59 ± 0,03	0,62 ± 0,04	0,28 ± 0,03	0,37 ± 0,02	37 ± 1,6
1нМ дексаметазона и 5 нМ H ₂ O ₂ , 30 мин	0,63 ± 0,03	0,69 ± 0,04	0,35 ± 0,04	0,40 ± 0,03	38 ± 1,8
1мкМ дексаметазона и 5 мкМ H ₂ O ₂ , 30 мин	0,84 ± 0,02*	0,78 ± 0,03*	0,67 ± 0,03*	0,73 ± 0,03	63 ± 2
1нМ дексаметазона и 5 мкМ H ₂ O ₂ , 30 мин	0,77 ± 0,03*	0,75 ± 0,02*	0,52 ± 0,03*	0,49 ± 0,03*	40 ± 1,5
1мкМ дексаметазона и 5 нМ H ₂ O ₂ , 30 мин	0,81 ± 0,03*	0,76 ± 0,02*	0,56 ± 0,03*	0,66 ± 0,03*	52 ± 1,8*

*Отличия от контроля достоверны, $p \leq 0,05$.

Исследование структурного состояния мембран клеток тимуса после предварительного внесения максимальной концентрации дексаметазона и последующего добавления такого же количества перекиси водорода вызывало значительное изменение всех анализируемых показателей. Так, микровязкость липидной фазы мембран увеличилась при этом почти в 3 раза по отношению к контролю, а полярность – на 23,5 %. При использовании минимальной концентрации дексаметазона для предварительной обработки клеток и последующее взаимодействие с экзогенной H₂O₂ в концентрации 5 нМ было зарегистрировано увеличение всех показателей не более чем на 10 % по отношению к контролю.

Таким образом, можно предположить, что высокие дозы дексаметазона вызывают модификацию регуляторных механизмов в обработанных клетках и затем при добавлении перекиси водорода происходит усиление степени повреждающего воздействия данного агента на клетки. Тогда как, комбинированное действие дексаметазона и перекиси водорода в малых дозах существенно модифицируют структурное состояние мембран клеток, что, по-видимому, является первым этапом реализации механизмов действия данных экзогенных агентов через системы гомеостаза внутриклеточного кальция.

Затем проводилась серия экспериментов по изучению структурного состояния мембран тимоцитов при действии дексаметазона на фоне оксидативного стресса, вызванного прединкубацией суспензии клеток перекисью водорода в течении 30 мин. Полученные результаты отображены в табл. 3.

Как следует из табл. 3, минимальная концентрация синтетического аналога глюкокортикоидных гормонов после прединкубации минимальной концентрацией перекиси водорода вызывал изменение всех тестируемых нами показателей в мембранах тимоцитов контрольных животных. Полярность аннулярных липидов возросла почти на 40 %, а липидного бислоя – только на 25 %. Показатели микровязкости аннулярного липида увеличивались примерно на 50 %, а микровязкость липидного бислоя уменьшилась на 27 % по сравнению с контролем.

Таблица 3

Влияние различных концентраций дексаметазона на физико-химические характеристики структурного состояния плазматических мембран тимоцитов крыс (прединкубация с перекисью водорода в течение 30 мин)

Table 3

Effect of different concentrations of dexamethasone on the physicochemical characteristics of the structural state of plasma membranes of rat thymocytes (preincubation with hydrogen peroxide for 30 minutes)

Условия	Полярность		Микровязкость		Степень тушения белковой флуоресценции, %
	аннулярного липида	липидного бислоя	аннулярного липида	липидного бислоя	
Контроль	0,59 ± 0,03	0,62 ± 0,04	0,28 ± 0,03	0,37 ± 0,02	37 ± 1,6
5 нМ H ₂ O ₂ и 1нМ дексаметазона, 30 мин	0,82 ± 0,02*	0,77 ± 0,03*	0,42 ± 0,03*	0,27 ± 0,02*	18 ± 2*
5 мкМ H ₂ O ₂ и 1мкМ дексаметазона, 30 мин	0,83 ± 0,02*	0,76 ± 0,02*	0,35 ± 0,03	0,22 ± 0,02*	25 ± 2*
5 мкМ H ₂ O ₂ и 1нМ дексаметазона, 30 мин	0,83 ± 0,03*	0,75 ± 0,02*	0,48 ± 0,03*	0,25 ± 0,03*	22 ± 2*
5 нМ H ₂ O ₂ и 1мкМ дексаметазона, 30 мин	0,87 ± 0,02*	0,76 ± 0,03*	0,41 ± 0,03*	0,23 ± 0,03*	24 ± 2*

*Отличия от контроля достоверны, $p \leq 0,05$.

Влияние максимальных концентраций данных агентов на клетки тимуса экспериментальных животных имело наиболее выраженный эффект в отношении показателя микровязкости липидного бислоя в сравнении с контрольными значениями. Данный результат меньше контрольных значений на 40 %, а показатель микровязкости в области аннулярных липидов увеличился на 25 %. Степень тушения белковой флуоресценции в тимоцитах после инкубации с перекисью водорода и дексаметазоном уменьшилась на 50 %.

При изучении влияния минимальной концентрации дексаметазона после получасовой инкубации с максимальной концентрацией перекиси водорода было отмечено увеличение результатов микровязкости мембран в области аннулярных липидов, зарегистрировано увеличение показателя на 10 %, а в области липидного бислоя уменьшение на 40 %. Показатель полярности в области липидного бислоя изменился незначительно. Степень тушения белковой флуоресценции составляла 22 %.

Далее проводилось исследование изменений физико-химических характеристик структурного состояния мембран тимоцитов при действии дексаметазона в максимальной концентрации на фоне прединкубации минимальной концентрацией перекиси водорода. Как следует из табл. 3, при этом отмечалось достоверное увеличение показателей, характеризующих полярность. Так, в области аннулярных липидов данный показатель увеличился на 47 %, а в области липидного бислоя на 22 %, микровязкость в области липидного бислоя уменьшилась почти на 40 %, а в области аннулярного липида увеличилась более чем на 45 %. Отмечено изменение степени тушения белковой флуоресценции, она уменьшилась на 35 %.

Подводя итог данной серии экспериментов, необходимо отметить, что уменьшение показателей микровязкости липидного бислоя в данных опытах наблюдалось вследствие мембранопосредованного действия перекиси водорода, поскольку данное вещество активирует процессы перекисного окисления липидов [4].

Установлено, что дексаметазон, взаимодействуя с мембранами тимоцитов, вызывает изменение их физико-химических характеристик: показателей полярности и микровязкости липидов плазматических мембран. Наиболее выраженные изменения наблюдались в области аннулярных липидов, микровязкость в этой области увеличивалась в 1,5–2 раза в зависимости от времени инкубации и концентрации дексаметазона.

Экзогенное воздействие перекиси водорода на клетки тимуса приводит к таким изменениям в структурном состоянии плазматических мембран тимоцитов, как увеличение полярности в 1,3 раза, микровязкости в области аннулярных липидов в 2 раза и липидного бислоя в 1,7 раза, а также увеличение степени тушения белковой флуоресценции в 2 раза. Эти результаты свидетельствуют об активации процессов перекисного окисления липидов, вызванных воздействием перекиси водорода на клетки, что говорит о его влиянии на изменение структурного состояния плазматических мембран тимоцитов.

Заключение

Из проведенного исследования можно сделать вывод, что комбинированное действие перекиси водорода и дексаметазона способно вызывать изменение физико-химических параметров плазматических мембран тимоцитов крыс: увеличение полярности аннулярных липидов и микровязкости аннулярного липида, уменьшение микровязкости липидного бислоя, снижение степени тушения белковой флуоресценции. Минимальные и максимальные концентрации данных веществ имеют различный эффект на указанные параметры, что может определять сложное взаимодействие между перекисью водорода и дексаметазоном в данном случае. Таким образом, в результате проведенных экспериментов доказано, что комбинированное действие перекиси водорода и дексаметазона способно вызывать модификацию физико-химических параметров плазматических мембран тимоцитов крыс, что может изменять состояние мембраносвязанных белков, а также белок-липидных взаимодействий.

Библиографические ссылки

1. Adcock I, Mumby S Glucocorticoids. *Handbook of experimental pharmacology*. 2017;(237):171–196.
2. Jeffrey G Tasker, Shi Di, Renato Malcher-Lopes Minireview: rapid glucocorticoid signaling via membrane-associated receptors. *Endocrinology*. 2006; 147(12):5549–5556.
3. Botía M, Escibano D. General Characteristics and Measurement of the Main Glucocorticoids. *Scholarly Community Encyclopedia*. 2019 [Internet, cited 16 October 2024]. URL: <https://encyclopedia.pub/entry/40654>.
4. Scherholz ML, Schlesinger N, Androulakis IP. Chronopharmacology of glucocorticoids. *Advanced drug delivery reviews*. 2019;2(21):245–261.
5. Almokhtar AA, Elsayed AS, Azab AE, Quwaydir FA. Oxidative stress and antioxidant mechanisms in human body. *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering*. 2019;6(1):34–37.
6. Pisoschi AM, Pop A. The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *European journal of medicinal chemistry*. 2015;5(97):55–74.
7. Матусевич АК, Карузин КА. Оксидативный стресс и его роль в формировании дизадаптации и патологии. *Биорадикалы и антиоксиданты*. 2015;2:5–29.
8. Жигулина ВВ. Биохимический ответ организма на стресс (обзор литературы). *Верхневолжский медицинский журнал*. 2014;4:25–30.
9. Клаус Дж. *Лимфоциты (методы)*. Москва: Мир; 1990. 256 с.
10. Добрецов ГЕ, Владимиров ЮА. Флуоресцентные зонды в исследовании биологических мембран. Москва: Наука, 1980. 320 с.
11. Хлопова АЕ, Щербакowa ИВ. Условия применения t-критерия Стьюдента в медицине. *Бюллетень медицинских Интернет-конференций*. 2014;4(11):1276–1278.

References

1. Adcock I, Mumby S Glucocorticoids. *Handbook of experimental pharmacology*. 2017;(237):171–196.
2. Jeffrey G Tasker, Shi Di, Renato Malcher-Lopes Minireview: rapid glucocorticoid signaling via membrane-associated receptors. *Endocrinology*. 2006; 147(12):5549–5556.
3. Botía M, Escibano D. General Characteristics and Measurement of the Main Glucocorticoids. *Scholarly Community Encyclopedia*. 2019 [Internet, cited 16 October 2024]. Available from: <https://encyclopedia.pub/entry/40654>.
4. Scherholz ML, Schlesinger N, Androulakis IP. Chronopharmacology of glucocorticoids. *Advanced drug delivery reviews*. 2019;2(21):245–261.
5. Almokhtar AA, Elsayed AS, Azab AE, Quwaydir FA. Oxidative stress and antioxidant mechanisms in human body. *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering*. 2019;6(1):34–37.
6. Pisoschi AM, Pop A. The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *European journal of medicinal chemistry*. 2015;5(97):55–74.
7. Matusevich AK, Karuzin KA. *Oksydativnyy stress i ego rol v formirovanii dizadaptatsii i patologii* [Oxidative stress and its role in the formation of dysadaptation and pathology]. *Bioradicals and antioxidants*. 2015;2:5–29. Russian
8. Zhigulina VV. *Biokhimicheskiy otvet organizma na stress (obzor literatury)* [Biochemical Response of the Body to Stress (Literature Review)]. *Verkhnevolzhsky meditsinskiy journal*. 2014;2:25–30. Russian.
9. Claus J. *Lymphocytometry: metody* [Lymphocytes. Methods]. Moscow: Mir; 1990. 256 p. Russian.
10. Dobretsov GE, Vladimirov YuA. *Fluorescentnye zondy v issledovanii biologicheskikh membran* [Fluorescent probes in the study of biological membranes]. Moscow: Nauka; 1980. 320 p. Russian.
11. Chlopova AE, Shcherbakova IV. *Usloviy primeneniya t-kriteriya Studenta v medicine* [Conditions for the application of the Student's t-test in medicine]. *Bulletin of Medical Internet Conferences*. 2014;4(11):1276–1278. Russian.

Статья поступила в редколлегию 02.08.2024.
Received by editorial board 02.08.2024.

МИКРООКРУЖЕНИЕ ОПУХОЛИ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

**А. В. ВЕЛИЧКО^{1), 2)}, Д. Б. НИЖЕГОРОВОДА^{1), 2)}, Е. М. НАЗАРЕНКО²⁾,
Б. А. МУЗЫЧЕНКО¹⁾, М. М. ЗАФРАНСКАЯ^{1), 2)}**

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

²⁾Белорусский государственный медицинский университет, НИИ экспериментальной и клинической медицины,
пр. Дзержинского, 83, 220083, г. Минск, Беларусь

Рост и прогрессирование новообразований – многостадийный процесс, опосредованный взаимодействиями между опухолевыми клетками и окружающей их стромой, включающие различные типы (фибробласты, эндотелиальные клетки, иммунные клетки), бесклеточные компоненты (цитокины, внеклеточные везикулы и внеклеточный матрикс), кровеносные и лимфатические сосуды, которые формируют микроокружение опухоли (ТМЕ – англ. Tumor microenvironment). Во время прогрессирования новообразований опухолевые клетки могут уклоняться от иммунного ответа посредством подавления или потери опухолевых антигенов, высвобождения иммуносупрессивных внеклеточных везикул, включая экзосомы, секретируя различные цитокины, хемокины и других факторов, а также начинают перепрограммировать и ремоделировать окружающую строму. Наиболее актуальными направлениями изучения ТМЕ выступают клетки и молекулы врожденного и приобретенного иммунитета, которые по причине высокой гетерогенности и пластичности проявляют как супрессивную, так и стимулирующую активность в отношении опухолевых клеток. Особое внимание уделяется иммунным контрольным точкам, опухолевой микробиоте, компонентам межклеточного взаимодействия, а также иммунотерапии опухолевых заболеваний.

В данной работе проведен систематический обзор научных публикаций базы данных PubMed, посвященных изучению ТМЕ, опубликованных с 2019 по 2024 гг. В ходе систематического обзора изучено 2547 источников, из которых в процессе скрининга отобрано 68 статей, включенных в исследование. Поисковые запросы и ключевые фразы содержали «микроокружение опухоли», «иммунные клетки», «опухоль», «онкогенез», «метастазирование».

Образец цитирования:

Величко АВ, Нижегородова ДБ, Назаренко ЕМ, Музыченко БА, Зафранская ММ. Микроокружение опухоли: систематический обзор. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;4:85–98.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-85-98>

For citation:

Vialichka AV, Nizheharodava DB, Nazaranka EM, Muzychenka BA, Zafranskaya MM. Tumor microenvironment: systematic review. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;4:85–98. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-85-98>

Авторы:

Алеся Валерьевна Величко – аспирант кафедры иммунологии¹⁾; младший научный сотрудник отдела иммунологии и биомедицинских технологий научно-исследовательской лаборатории²⁾.

Дарья Борисовна Нижегородова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры иммунологии¹⁾; ведущий научный сотрудник отдела иммунологии и биомедицинских технологий научно-исследовательской лаборатории²⁾.

Елизавета Максимовна Назаренко – младший научный сотрудник отдела иммунологии и биомедицинских технологий научно-исследовательской лаборатории.

Богдан Андреевич Музыченко – преподаватель кафедры иммунологии.

Марина Михайловна Зафранская – доктор медицинских наук, профессор; заведующий кафедрой иммунологии¹⁾; главный научный сотрудник отдела иммунологии и биомедицинских технологий научно-исследовательской лаборатории²⁾.

Authors:

Alesia V. Vialichka, graduate student at the department of immunology^a; junior researcher at the department of immunology and biomedicine technology, scientific research laboratory^b.
alesjswiskay@mail.ru

Darya B. Nizheharodava, PhD (biology), docent; associate professor at the department of immunology^a; leading researcher at the department of immunology and biomedicine technology, scientific research laboratory^b.
nzh@tut.by

Elizaveta M. Nazaranka, junior researcher at the department of immunology and biomedicine technology, scientific research laboratory.
el.m.nazarenko@gmail.com

Bogdan A. Muzychenka, teacher at the department of immunology.
bogdan.muzychenko.isei@gmail.com

Marina M. Zafranskaya, doctor of science (medicine), full professor; head of the department of immunology^a; principal scientific researcher at the department of immunology and biomedicine technology, scientific research laboratory^b.
zafranskaya@gmail.com

Сформированная группа научных статей позволит более детально изучить клеточный и молекулярный состав опухолевого микроокружения, а также основные мишени для разработки новых методов диагностики и терапии злокачественных новообразований с вовлечением TME.

Ключевые слова: микроокружение; опухоль; иммунные клетки; иммунологические контрольные точки; микробиота; терапия.

TUMOR MICROENVIRONMENT: SYSTEMATIC REVIEW

A. V. VIALICHKA^{a, b}, D. B. NIZHEHARODAVA^{a, b}, E. M. NAZARANKA^b,
B. A. MUZYCHENKA^a, M. M. ZAFRANSKAYA^{a, b}

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

^bBelarusian State Medical University, Research Institute of Experimental and Clinical Medicine,
83 Dziarzhynsky Avenue, Minsk 220083, Belarus

Corresponding author: A. V. Vialichka (alesjsworskay@mail.ru)

The growth and progression of a neoplasm is a multi-stage process mediated by interactions between tumor cells and their surrounding stroma including various cell types (fibroblasts, endothelial cells, immune cells), cell-free components (cytokines, extracellular vesicles and extracellular matrix), blood and lymphatic vessels that form the tumor microenvironment. During the progression of neoplasms, tumor cells can evade the immune response by suppressing or losing tumor antigens releasing immunosuppressive extracellular vesicles and exosomes, secreting various cytokines, chemokines and other factors, and begin to reprogram and remodel the surrounding stroma. The most relevant areas of TME study are cells and molecules of innate and acquired immunity exhibited both suppressive and stimulating activity against tumor cells due to their high heterogeneity and plasticity. Special attention is paid to immune control points, tumor microbiota, components of intercellular interaction as well as immunotherapy of tumor diseases.

In this paper, a systematic review of scientific publications in PubMed database devoted to the study of TME and published in the period from 2019 to 2024 was carried out. 2547 sources were studied and 68 articles were selected during the screening process. Search queries and keywords included «tumor microenvironment», «immune cells», «tumor», «oncogenesis», «metastasis». The formed group of scientific articles will allow to study in more detail the cellular and molecular composition of the tumor microenvironment, as well as the main targets for the development of new approaches for malignant neoplasms diagnosis and therapy involving TME.

Keywords: microenvironment; tumors; immune cells; immunological checkpoints; microbiota; therapy. .

Введение

Опухолевое микроокружение (TME – Tumor microenvironment) представляет собой сложную структуру, состоящую из стромы, иммунных клеток, раковых стволовых клеток, внеклеточного матрикса, а также фибробластов, нейроэндокринных клеток, жировых клеток и сети кровеносных и лимфатических сосудов [1]. TME определяет малигнизацию опухоли наряду с генетическими мутациями, а также факторами окружающей среды, включая курение табака, употребление алкоголя, действие химических канцерогенов, онкогенных вирусов и нарушение микробиоты, которые могут создавать среду, благоприятную для злокачественных новообразований. Все чаще доказывается, что оно играет критическую роль в последующем развитии более стойких и запущенных злокачественных новообразований [2], так как не только позволяет опухолевым клеткам ускользать от иммунологического надзора, но и поддерживает рост, прогрессирование и распространение опухоли, индуцируя ангиогенез и образование раковых стволовых клеток [3].

Подобно хроническому воспалению, злокачественные клетки выделяют такие провоспалительные медиаторы, как цитокины, хемокины и эйкозаноиды, которые рекрутируют и перепрограммируют различные типы провоспалительных лейкоцитов и других клеток для создания более благоприятного протуморогенного микроокружения. Под влиянием опухоли значительным изменениям подвергается иммунный профиль в TME, переключаящий основные эффекторы иммунитета – Т-клетки – на состояние толерантности и активирующий супрессивные клетки. Иммунное уклонение от рака включает в себя переключение иммунных реакций с хелперных Т-лимфоцитов 1 типа на 2 типа, активацию проопухолевой функции антиген-презентирующих клеток, нарушение цитотоксической активности Т-клеток и естественных киллеров, созревание таких иммуносупрессивных клеток, как миелоидных супрессорных и регуляторных Т-лимфоцитов [4].

Таким образом, изучение механизмов функционирования клеток и факторов в микроокружении опухоли может способствовать контролю прогрессирования злокачественных новообразований и достижению положительных результатов в диагностике и терапии [1; 5].

В связи с этим, цель данного исследования – проведение систематического обзора литературных данных базы PubMed о современных представлениях ТМЕ, опубликованных за период с 2019 по 2024 гг.

Материалы и методы исследования

В исследовании рассматриваются различные аспекты ТМЕ путем анализа существующей совокупности научных данных в базе PubMed. Поиск ограничен статьями, которые опубликованы на английском языке за последние 5 лет. Для выявления статей использованы следующие поисковые запросы и фразы: «микроокружение опухоли», «иммунные клетки», «опухоль», «онкогенез», «метастазирование».

Аннотации доступных статей детально проанализированы, чтобы определить их качество и уместность, а также изучены цель, дизайн изучения, результаты и выводы в каждом из отобранных материалов. На рис. 1 показана блок-схема Prisma для данного исследования. Блок-схема Prisma представляет собой руководство по более полной отчетности, призванное решить проблему некачественной отчетности систематических обзоров и метаанализов [7].



Рис. 1. Блок-схема отбора для систематического обзора (диаграмма Prisma)

Fig. 1. Selection flowchart for systematic review (Prisma diagram)

На блок-схеме (рис. 1) отражена динамика анализа информации на различных этапах систематического обзора: количество идентифицированных публикаций по названию; количество публикаций, включенных на основании названий в скрининг; количество отобранных полнотекстовых статей, оцененных на приемлемость, количество статей, включенных в обзор и исключенных публикаций по названию, отсутствию полнотекстовых версий, неприемлемому содержанию.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате применения методологии проведения систематического обзора по изучению ТМЕ отобрано 68 полнотекстовых статей, приемлемых для обзора согласно критериям Prisma 2020: определение подходящих заголовков и аннотаций, оценка посредством обзора полного текста [7]. Осуществлен систематический обзор литературных данных электронной базы PubMed о современных представлениях ТМЕ,

опубликованных за 2019–2024 гг. На рис. 2а представлена динамика изменения количества научных работ, посвященных изучению ТМЕ, в течение последних 5 лет, характеризующая активный рост публикаций по данной теме. Статьи, включенные в обзор ТМЕ, классифицировали на 6 групп в зависимости от направления изучения (рис. 2б): 1) клеточный состав ТМЕ (опухолевые, иммунные, эндотелиальные и стромальные клетки); 2) молекулы ТМЕ (внеклеточные сигнальные молекулы, хемокины, цитокины, факторы роста); 3) межклеточные взаимодействия; 4) иммунные контрольные точки; 5) опухолевая микробиота; 6) терапия опухолевых заболеваний.

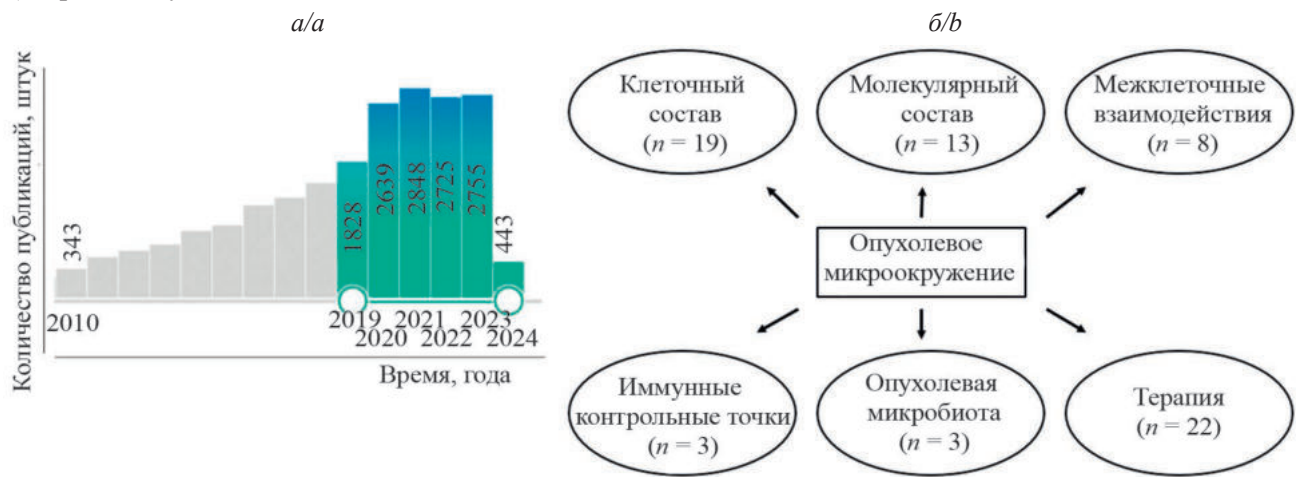


Рис. 2. Динамика изменения количества научных работ, посвященных изучению ТМЕ (а); направления изучения ТМЕ при проведении аналитического обзора (б)

Fig. 2. The dynamics of changes in the number of scientific papers devoted to the study of TME (a); areas of TME study in the scoping review (b)

Клеточный состав ТМЕ. В табл. 1 перечислены основные популяции клеточного компартмента ТМЕ, представленные опухолевыми и иммунными клетками, клетками стромы и эндотелиальными клетками сосудистого русла [6], взаимодействие между которыми определяет развитие и прогрессирование злокачественных новообразований. Злокачественные клетки проникают в здоровые ткани и распространяются в другие части тела через лимфатическую или кровеносную систему. Считается, что воспалительное микроокружение инициирует трансформацию эпителиальных клеток и способствует росту и прогрессированию опухоли. Хотя молекулярные механизмы, лежащие в основе хронического воспаления при канцерогенезе, до конца не изучены, передача сигналов ядерного фактора-карра В и некоторых цитокинов, таких как интерлейкин (IL)-6, 17, 22 и 23, важны для связи воспаления с онкогенезом [7].

Таблица 1

Клеточный состав ТМЕ

Table 1

TME cellular composition

Автор	Клеточная популяция	Результат
Laumont and Nelson (2023) [1]	TIL-B	Обнаруживаются вместе с Т-клетками и миелоидными клетками в горячих ТМЕ, секретируют противоопухолевые антитела, связаны с благоприятным прогнозом при многих видах рака
Terren, et al. (2019) [2]	NK-клетки	Метаболизм NK-клеток в иммуносупрессивном ТМЕ нарушается из-за недостатка питательных веществ и кислорода, высокой концентрации конечных продуктов метаболизма опухолевых клеток, что ограничивает их эффекторные функции
Ben-Shmuel, et al. (2020) [3]	NK-клетки	Экспрессируют активирующие и ингибирующие рецепторы, способны напрямую уничтожать опухолевые клетки, не требуя антигенной специфичности
Zheng, et al. (2023) [4]	Th1	Киллинг опухолевых клеток путем индукции апоптоза, антиангиогенные свойства

Автор	Клеточная популяция	Результат
Li, et al. (2020) [5]	Tregs	Иммуносупрессивная активность Tregs (секреция протуморогенных цитокинов, уничтожение и нарушение метаболизма эффекторных клеток) препятствует развитию эффективного противоопухолевого иммунитета
Yan, et al. (2022) [6]	Tregs	Иммуносупрессия, опосредованная секрецией иммуносупрессивных цитокинов, цитолизом зависимым от гранзима В/перфорина или Fas-FasL
Itahashi, et al. (2022) [8]	Tregs	Инфильтрация ТМЕ и подавление противоопухолевого иммунного ответа CD8 ⁺ Т-клеток, что способствует развитию и росту опухоли
McFarlane, et al. (2021) [9]; Wu, et al. (2020) [10]	Нейтрофилы	Высвобождение активных форм кислорода может вызвать гибель опухолевых клеток, но также может подавлять активность цитотоксических иммунных клеток
Awasthi, et al. (2024) [11]	TAN	Ингибируют CD4 ⁺ и CD8 ⁺ Т-клетки за счет экспрессии миелопероксидазы и Fas/FasL, способствуя росту опухоли
Jeong, et al. (2019) [12]	Моноциты	В первичных опухолях моноциты Ly6C ^{hi} оказывают протуморогенный эффект, способствуя пролиферации опухолевых клеток и их интравасации
Messex, et al. (2020) [13]	Макрофаги	Различные подтипы М2-макрофагов связаны с прогрессированием опухоли и метастазированием через их взаимодействие с другими компонентами ТМЕ и способность подавлять иммунные реакции
Chen, et al. (2021) [14]	TAM	TAM экспрессируют фенотип, подобный М2-макрофагам, который проявляется как иммуносупрессивное состояние и опухолевая прогрессия. Истощение TAM или изменение фенотипа на М1 повышает их цитотоксичность и стимулирует цитотоксические Т-клетки
Boutillier and Elswa (2021) [15]	TAM	Способствуют пролиферации злокачественных клеток, воспалению, супрессии иммунных клеток, ангиогенезу и лимфангиогенезу, а также резистентности к терапии
Wang, et al. (2021) [16]	TAM	TAM как М2-подобные макрофаги, секретируют факторы роста опухоли, способствуют ангиогенезу и подавляют Т-клетки
Hinshaw and Shevde (2019) [17]	DCs	Под влиянием цитокинов, синтезируемых опухолевыми клетками, активируют транскрипционные и метаболические пути, которые формируют проопухолевый фенотип DCs, посредством включения IDO, Arg1, iNOS и STAT3
Haas and Obenauf (2019) [18]	DCs	Опухолевые клетки подавляют дифференцировку, активацию и созревание DCs
Patwardhan and Mahendran (2023) [19]	CSCs	Способны к самообновлению, дифференцировке в несколько раковых линий и образованию опухоли
Frisbie, et al. (2022) [20]	CA-MSC	Способствуют росту опухоли и метастазированию, обеспечивают формирование ТМЕ

Примечание. TIL-B – опухоль-инфильтрирующие В-клетки; NK – естественные клетки-киллеры; Th1 – хелперные Т-клетки 1 типа; Tregs – регуляторные Т-клетки; TAN – нейтрофилы, ассоциированные с опухолью; TAM – макрофаги, ассоциированные с опухолью; DCs – дендритные клетки; CSCs – раковые стволовые клетки; CA-MSC – мезенхимальные стволовые/стромальные клетки, ассоциированные с карциномой; IDO – индоламин 2,3-диоксигеназа; Arg1 – аргиназа 1; iNOS – индуцируемая синтаза оксида азота; индуцируемая синтаза оксида азота, STAT3 – сигнальный белок и активатор транскрипции 3.

Note. TIL-B – tumor-infiltrating B-cells; NK – natural killer cells; Th1 – helper type 1 T-cells; Tregs – regulatory T-cells; TAN – neutrophils associated with tumor; TAM – macrophages associated with tumor; DCs – dendritic cells; CSCs – cancerous stem cells; CA-MSC – mesenchymal stem/stromal cells associated with carcinoma; IDO – indoleamine 2,3-dioxygenase; Arg1 – arginase 1; iNOS – inducible nitric oxide synthase; STAT3 – signal transducer and activator of transcription 3.

Молекулярный состав ТМЕ. Недавние исследования показали, что рекрутинг, успешная активация и перепрограммирование иммунных и стромальных клеток во внеклеточном пространстве являются также результатом взаимных взаимодействий между раковыми клетками и гуморальными факторами ТМЕ (табл. 2).

Во время роста опухоли клетки находятся в постоянном взаимодействии с ТМЕ, которое осуществляется не только посредством прямой межклеточной коммуникации, но и за счет хемокинов, цитокинов

или внеклеточных везикул, что способствует прогрессированию и инвазии опухоли, а также иммунному уклонению и устойчивости к терапии.

Таблица 2

Гуморальные факторы TME

Table 2

The humoral factors of TME

Автор	Молекулы	Результат
Barthel, et al. (2022) [21]	IL-8	Маркер проканцерогенных процессов, поддерживает инвазивные свойства опухоли и опосредует пластичность опухолевых клеток
Habanjar, et al. (2023) [22]	TNF α	Участвует в пролиферации опухолевых клеток, инфильтрации макрофагов, экспрессии воспалительных хемокинов и ангиогенезе
Niland, et al. (2021) [23]	MMP-14	Повышенная экспрессия на злокачественных клетках, необходима для перичеселлюлярного коллагенолиза и ремоделирования опухолевой стромы
Waldner and Neurath (2023) [24]	TGF β	Действует как супрессор опухолей на ранней стадии посредством индукции апоптоза или остановки клеточного цикла в предраковых клетках. Поддерживает иммуносупрессивное TME, что позволяет опухоли избежать иммунного ответа на поздних стадиях
Liu, et al. (2021) [25]	IL-35	Способствует росту первичных опухолевых клеток и метастазированию, индуцирует Tregs и подавляет эффекторные Т-клетки
Ene, et al. (2022) [26]	IL-6	Участвует в активации В-клеток, пролиферации и дифференцировке Т-клеток, апоптотических процессах, ангиогенезе
Codrici, et al. (2022) [27]	IL-8	Усиливает пролиферацию эндотелиальных клеток, хемотаксис, выживание и активацию протеаз
Kadomoto, et al. (2021) [28]	CCL2	Иницирует инфильтрацию специфических моноцитов, макрофагов, Т-лимфоцитов в опухолевые ткани
Bule, et al. (2021) [29]	CXCR3	Экспрессируется на Т-лимфоцитах, быстро индуцируется на наивных клетках после активации и остается высоко экспрессированным на CD4 ⁺ Т-клетках и эффекторных CD8 ⁺ Т-клетках
Knipper, et al. (2022) [30]	FGF2	FGF2, секретируемый опухолевыми клетками, способствует пролиферации перитцитов, что приводит к поляризации макрофагов в M2-фенотип, которые способствуют прогрессированию опухоли
Karagiannidis, et al. (2021) [31]	G-CSF	Оказывает прямое воздействие на опухолевые клетки, поддерживает жизнеспособность CSCs, пролиферацию и миграцию опухолевых клеток, способствует формированию протуморогенного фенотипа иммунных клеток (M2 макрофаги, миелоидные супрессорные клетки и Tregs)
Osipov, et al. (2019) [32]	CSF-1R	Регулирует дифференцировку, пролиферацию, миграцию и выживание миелоидных клеток, высокая экспрессия CSF-1R, при раке, ассоциируется с плохим прогнозом и иммуносупрессивным течением
SenGupta, et al. (2021) [33]	CCL3	Обеспечивает миграцию опухолевых клеток, образование нейтрофильных внеклеточных ловушек и продукцию активных форм кислорода

Примечание. IL – интерлейкин; TNF α – фактор некроза опухоли α ; MMP – матриксная металлопротеиназа; TGF β – трансформирующий фактор роста β ; CXCR – хемокиновый рецептор; FGF2 – фактор роста фибробластов 2; G-CSF – гранулоцитарный колониестимулирующий фактор; CSF-1R – рецептор колониестимулирующего фактора 1; CCL – хемокиновый лиганд.

Note. IL – interleukin; TNF α – tumor necrosis factor α ; MMP – matrix metalloproteinase; TGF β – transforming growth factor β ; CXCR – chemokine receptor; FGF2 – fibroblast growth factor 2; G-CSF – granulocyte colony stimulating factor; CSF-1R – colony stimulating factor receptor 1; CCL – chemokine ligand.

Межклеточные взаимодействия в TME. Рост и прогрессирование опухоли являются процессами, опосредованными взаимодействиями между раковыми клетками и окружающей их стромой, которые включают их различные типы и бесклеточные компоненты, формирующие TME. Многочисленные исследования показали, что классическая паракринная и эндокринная передача сигнала посредством секреции растворимых факторов, включая цитокины и факторы роста, во внеклеточное пространство способствует регуляции TME путем подавления или стимуляции прогрессирования новообразования. Более того,

прямой контакт между опухолевыми клетками и стромальными клетками может критически влиять на биологическое поведение раковых клеток [34–36].

Адгезивные и щелевые соединения, которые участвуют в формировании прямых связей между соседними клетками, включая раковые и стромальные, необходимы для разнообразных клеточных функций. Адгезивные соединения в основном состоят из трансмембранных молекул клеточной адгезии, таких как кадгерины и нектины, и каркасных белков, которые связываются с внутриклеточной областью молекул клеточной адгезии, чтобы стабилизировать их локализацию на поверхности клетки. Инвазивные раковые клетки обычно контактируют со стромальными через молекулы клеточной адгезии адгезивных соединений.

Прямой контакт раковых клеток со стромальными клетками в ТМЕ опосредуется взаимодействием между лигандом, связанным с мембраной, и его рецептором, сигналом для которых является Notch-путь, способствующий прогрессированию опухоли на разных стадиях [37; 38].

Недавно были идентифицированы новые типы межклеточной коммуникации, обозначенные как туннельные нанотрубочки (TNT) и опухолевых микротрубочки (ТМ), которые функционируют как в нормальных, так и в раковых клетках. TNT и ТМ представляют собой тонкие мембранные каналы, содержащие F-актин, которые различаются по размеру, чтобы обеспечить прямую связь между раковыми клетками и стромальными клетками на больших расстояниях [39].

В процессе прогрессирования новообразования раковые клетки разрушают базальную мембрану и отделяют тканевую паренхиму от эпителиального слоя, в связи с чем компоненты внеклеточного матрикса играют важную роль в формировании ТМЕ. Кроме того, в процессе инвазии рост опухоли частично контролируется ТМЕ посредством паракринных взаимодействий. В таких случаях ассоциированная с опухолью строма обеспечивает питательные вещества, кислород, ферменты и связанные с матриксом факторы роста, которые способствуют прогрессированию и пролиферации опухоли [33].

Таблица 3

Межклеточные взаимодействия

Table 3

Intercellular interactions

Автор	Компонент	Результат
Jiang, et al. (2023) [34]	Перициты	Участвуют в формировании пре-метастатической ниши, содействуют росту опухолевых клеток и лекарственной устойчивости посредством паракринной активности и индукции поляризации макрофагов M2
Arneth (2019) [35], Almeida-Nunes, et al. (2022) [36]	Стромальные клетки	Участвует в формировании и развитии рака, внутриклеточная сигнализация в ТМЕ может регулировать ангиогенез. Несколько путей функционируют как мощные регуляторы, способствующие агрессивному и метастатическому воздействию опухоли
Ducimetiere, et al. (2019) [37]	ECM	Во время прогрессирования рака нарушение регуляции ECM способствует инвазии, ангиогенезу и облегчает инфильтрацию иммунных клеток. НК-клетки могут модулировать ECM посредством секреции фибронектина 1, что приводит к структурным изменениям в первичной опухоли и уменьшению метастазирования
Rossi, et al. (2020) [38]	Галектины	Связаны с ангиогенезом, выживанием опухолевых клеток, инвазией, метастазированием и избеганием иммунного надзора
Mun, et al. (2022) [39]	TECs	Образуют важный сосудистый внутренний слой в большинстве опухолях, организуют ТМЕ, привлекают и активируют Т-клетки
Sato, et al. (2021) [40]	TNTs, TMs	Являются мембранными каналами, содержащие F-актин, обеспечивают прямую связь между опухолевыми клетками и клетками стромы на большие расстояния, обеспечивают быстрый обмен клеточными компонентами и молекулами, включая органеллы, везикулы, молекулы и ионы
Wei, et al. (2020) [41]	EVs	Участвуют в дистанционной коммуникации между опухолью и клетками ТМЕ, перенося множество биологически активных молекул, которые способствуют возникновению и прогрессированию рака

Примечание. ECM – внеклеточный матрикс; TECs – опухолевые эндотелиальные клетки; TNTs – туннельные нанотрубочки и TMs – опухолевых микротрубочек; EVs – внеклеточные везикулы.

Note. ECM – extracellular matrix; TECs – tumor endothelial cells; TNTs – tunneling nanotubes and TMs – tumor microtubules; EVs – extracellular vesicles.

Ингибиторные контрольные точки. Помимо субпопуляционного состава важное значение имеет функциональная регуляция противоопухолевого сигнала и экспрессия иммунных контрольных точек. Молекулы иммунных контрольных точек, включая ингибирующие и стимулирующие молекулы иммунных контрольных точек, определяются как пары лиганд-рецептор, которые оказывают ингибирующее или стимулирующее воздействие на иммунные реакции. Большинство молекул иммунных контрольных точек, которые описаны до сих пор, экспрессируются на клетках адаптивной иммунной системы, особенно на Т-клетках, и врожденной иммунной системы. Например, PD-1 широко экспрессируется в В-клетках, Т-клетках, естественных клетках-киллерах и миелоидных клетках. В качестве лиганда PD-1 лиганд 1 запрограммированной гибели клеток (PD-L1) может экспрессироваться в дендритных клетках, макрофагах, Т-клетках, НК-клетках и опухолевых клетках. Связываясь с PD-L1, в присутствии сигнального комплекса рецептора Т-клеток PD-1 инициирует коингибирующий сигнал, что приводит к прекращению передачи информации и ингибированию пролиферации, анергии и истощению Т-клеток [41]. Yi, et al. (2021) отмечает, что в ТМЕ сверхэкспрессированный PD-L1 на опухолевых клетках связывается с PD-1 на инфильтрирующих опухоль лимфоцитах и активно образуется комплекс PD-1/PD-L1, что противодействует каскаду сигналов и способствует нарушению активации Т-клеток, позволяя, тем самым, избегать иммунный надзор [42]. Simiczujew, et al. (2020) подчеркивает, что сверхэкспрессия PD-1 Т-клетками и постоянное воздействие опухолевых антигенов провоцирует их иммунную невосприимчивость, потерю эффекторных функций [43]. Capitani, et al. (2021) сообщает, что CTLA-4 (цитотоксический белок, ассоциированный с Т-лимфоцитами 4) запускает ингибирующий сигнал, который препятствует опосредованной Т-клеточной активации сигнальных молекул [44].

Микробиота. В последнее время в поддержании ТМЕ большое внимание уделяется роли микробиоты, которые колонизируют слизистые оболочки и кожу, продуцируют метаболиты и молекулы, оказывая прямое систематическое и локальное воздействие на развитие опухолевого процесса. Внутриопухолевые микробные компоненты обнаруживаются во многих тканях новообразований и тесно коррелируют с возникновением и развитием рака, а также с эффективностью терапии. Некоторая внутриопухолевая микробиота может быть тесно связана с плохим прогнозом у пациентов с опухолями. Deng, et al. (2022) отмечает, что *H. Pylori* регулируя опухолевые стромальные клетки, иммунные контрольные точки и другие регуляторные факторы, создает микросреду, которая обеспечивает постоянную колонизацию и облегчает возникновение опухолей. *H. Pylori* при раке желудка и колоректальной аденоме способствует более высокому риску заболевания и ухудшению болезненных состояний [45]. Другое исследование, Wong-Rolle, et al. (2021), свидетельствует, что связывание молекул адгезии *F. Nucleatum* с мотивами клеточной поверхности опухолевых или иммунных клеток, приводит к онкогенному или иммуносупрессивному сигналингу. *F. Nucleatum* и *P. Gingivalis* коррелируют с более высоким риском рака поджелудочной железы. Кроме того, повышенные уровни *F. Nucleatum* тесно коррелируют с поздней стадией и рецидивом плоскоклеточного рака пищевода [46]. Jiang, et al. (2022), сообщает, что молекулы FadA, экспрессируемые *F. Nucleatum*, регулируют воспаление и онкогенез за счет связывания с Е-кадгерин и активации сигнализации β-катенина, играют опухолеобразующую роль в ингибировании пролиферации Т-клеток и индукции апоптоза Т-клеток [47].

Раковая микробиота и другие микроорганизмы в ТМЕ влияют на такие процессы, как биотрансформация и метаболизм ксенобиотиков, которые определяют онкогенез, в частности, скорость роста и распространения опухолевых клеток в организме. Недавние исследования показали, что микробиота оказывает выраженное влияние на эффективность таких методов лечения рака, как иммунотерапия. Таким образом, опухолевая микробиота считается важным фактором, который может влиять на здоровье онкологических пациентов и определять их ответ на терапию [46].

ТМЕ-ориентированная терапия. Терапия новообразований остается сложным процессом, в котором используются как традиционные подходы к лечению (хирургия, химиотерапия и лучевая терапия), так и новые направления с использованием таргетной терапии, нанопрепаратов, природных антиоксидантов, гемодинамической терапии, терапии на основе ферроптоза (табл. 4). Современным иммунотерапевтическим подходом является использование противоопухолевых вакцин. Механизм действия этих препаратов состоит в иммунизации пациента опухоль-ассоциированными антигенами, что приводит к активации адаптивного звена иммунной системы, направленного на опухолевые клетки. Наиболее перспективной представляется разработка дендритно-клеточных вакцин, в основе которых лежит способность дендритных клеток презентировать антиген Т-лимфоцитам, вызывать их активацию и инициировать противоопухолевый иммунный ответ [48].

Таблица 4

Терапия опухолевых заболеваний

Table 4

Therapy of tumor diseases

Автор	Терапевтический агент	Результат
Genova, et al. (2021) [48]	АСТ	Терапия АСТ включает адаптивный перенос TIL или сконструированных Т-клеток, обладающих специфичностью и высоким сродством к опухолевым антигенам
Liu, et al. (2021) [49]	CAR-T-клетки	TME включает ингибирующие факторы, которые влияют на функцию CAR-T-клеток, среди которых повышенная регуляция ингибирующих рецепторов контрольных точек, растворимые цитокины, измененные профили экспрессии хемокинов, сложный стромальный состав, гипоксия и аномальный метаболизм опухоли
Wang, et al. (2023) [50] Petitprez, et al. (2020) [51]	Анти-PD-1	Анти-PD-1 предотвращает связывание PD-1 и его лигандов PD-L1 и PD-L2, тем самым способствуя пролиферации Т-клеток и продукции цитокинов. Анти-PD-1 DCs реагируют на IFN γ , продуцируемый соседними Т-клетками, путем секреции IL-12, тем самым усиливая опосредованное Т-клетками уничтожение опухолевых клеток
Liu, et al. (2022) [52]	PD1/CD28	Химерный рецептор-переключатель PD1/CD28 получен путем слияния внеклеточного домена PD-1 с трансмембранным и внутриклеточным доменами CD28. Преобразование ингибирующего сигнала PD-1 в активирующий сигнал CD28 эффективно подавляет рост опухоли и увеличивает инфильтрацию Т-клеток памяти, продлевает долгосрочный противоопухолевый эффект и снижает секрецию IL-6
Lu, et al. (2019) [53]	Моноклональные антитела к TIM3	Восстанавливают реакцию Т-клеток на опухолевые антигены, а комбинации антител оказывают аддитивный эффект
Byrne, et al. (2021) [54]	Агонист CD40	Активирует эффекторные функции в макрофагах, В-клетках и DCs, индуцирует цитокины Th1, такие как IL-12
Jedlicka, et al. (2022) [55]	BiKEs и TriKEs	BiKEs и TriKEs представляют собой НК-клетки с двумя или тремя одноцепочечными вариabельными фрагментами с различной антигенной специфичностью, что обеспечивает точный межклеточный контакт с опухолевой клеткой
Jia, et al. (2023) [56]	Анти-CD19 CAR-NK-клетки	Анти-CD19 CAR-NK-клетки используются для улучшения способности к уничтожению опухолевых клеток и специфичности НК-клеток
Madeddu, et al. (2022) [57]	Ингибиторы EGFR-тирозинкиназы	Усиливают презентацию антигенов МНС класса I и II в ответ на IFN γ , повышают уровни CD8 ⁺ Т-клеток и DCs, устраняют Tregs и снижают экспрессию PD-L1 в раковых клетках
Zhang, et al. (2023) [58]	Ингибиторы NLRP3	Подавляют сигналы TGF β , MAPK и NF- κ B, что поддерживает противоопухолевый эффект.
Zhao, et al. (2022) [59]	Нейтрализующие антитела к VEGF или VEGFR.	Нейтрализующие антитела к VEGF или VEGFR создают иммуносупрессивное TME, подавляют презентацию антигена, стимулируют активность Tregs и TAM
Peng, et al. (2021) [60]	Агонист TLR3 ARNAX	Иницирует CD8 ⁺ Т-клетки без продукции цитокинов, вызывать регрессию опухоли без системного воспаления и может повышать эффективность блокады PD-1/PD-L1
Garris and Luke (2020) [61]	Агонист TLR7/8 NKTR-262	Запускает экспрессию провоспалительных генов, что ведет к увеличению интратуморальных реакций IFN, хемокинов Т-клеток и инфильтрирующих опухоль CD8 ⁺ Т-клеток
Jang, et al. (2021) [62]	NP против TAM	Стратегии на основе NP, нацеленные на TAM, в TME: истощение макрофагов в опухолевых тканях; ингибирование рекрутинга моноцитов; перепрограммирование TAM типа M2 в противоопухолевые макрофаги типа M1

Автор	Терапевтический агент	Результат
Raju, et al. (2022) [63]	NP	Нагруженные лекарством NP могут ингибировать гипоксический рост опухоли, оказывая влияние на аномальную сосудистую сеть опухоли, перепрограммировать макрофаги M2 в фенотип M1, которые реактивируют иммунный ответ и ингибируют рост опухоли, активировать зрелые DCs, что приводит к активации В-клеток через Т-клетки
Ghaffari and Rezaei (2023) [64]	Эозинофилы	Лечение с помощью блокады иммунных контрольных точек и цисплатина увеличивает IL-5 и IL-33, которые увеличивают дифференцировку и рекрутинг эозинофилов соответственно
Grisaru-Tal, et al. (2022) [65]	Эозинофилы	Эозинофилы проникают в различные типы солидных опухолей и обладают плеiotропной активностью посредством прямого взаимодействия с опухолевыми клетками и сложного перекрестного взаимодействия с лимфоцитами. Влияют на ответ на различные формы иммунотерапии, опосредованной Т-клетками
Xu, et al. (2023) [66]	CAF	CAF могут быть ингибированы путем нацеливания на пути хемокинов и факторов роста, чтобы усилить иммунологическую инфильтрацию Т-клеток
Shen, et al. (2024) [67]	Онколитические вирусы (например, T-Vec)	Онколитические вирусы могут напрямую лизировать опухолевые клетки или косвенно оказывать противоопухолевое действие, вызывая системные иммунные ответы. T-Vec сконструированный низкотоксичный вирус простого герпеса, экспрессирующий гранулоцитарно-макрофагальный колониестимулирующий фактор
Johnson, et al. (2022) [68]	B7H3.CAR-T-клетки	B7H3.CAR-T-клетки с онколитическим аденовирусом (oAd-CXCL11) с B7H3-связывающей CAR Т-клеткой (B7H3.CAR-T) эффективны для замедления прогрессирования и устранения опухоли
Liu, et al. (2023) [69]	Радиотерапия	Изменяет ТМЕ, воздействуя на многочисленные клеточные и неклеточные компоненты. Вызывает локальное увеличение количества и субпопуляционного разнообразия Т-клеток в пределах облученной опухоли

Примечание. ACT – опухоли-реактивные Т-клетки; BiKEs или TriKEs – би- или триспецифические активаторы NK-клеток; NLRP3 – пириновый домен 3 семейства NLR; TLR – толл-подобный рецептор; NP – наночастицы.

Note. ACT – tumor-reactive T-cells; BiKEs or TriKEs – bi- or trispecific activators of NK-cells; NLRP3 – pyrin domain 3 of the NLR family; TLR – toll-like receptor; NP – nanoparticles.

Терапия химерными антигенными рецепторами (CAR)-Т-клетками стала многообещающим иммуно-терапевтическим подходом к борьбе с раком. Подход заключается в использовании генетически модифицированных иммунных клеток, экспрессирующих поверхностный рецептор, называемый CAR, который специфически нацелен на антигены, экспрессируемые на поверхности опухолевых клеток. Однако ценность этой терапии остается неубедительной в контексте солидных опухолей и сдерживается рядом препятствий, включая ограниченный транспорт опухоли и ее инфильтрацию, наличие иммуносупрессивного опухолевого микроокружения, а также нежелательные явления, связанные с такой терапией [52; 57].

Таким образом, в каждом из вышеуказанных направлений получены многообещающие результаты, позволяющие расширить существующие представления о структуре и функциональной роли ТМЕ, а также возможные подходы к его модуляции.

На рис. 3 представлены результаты систематического обзора по соотношению количества публикаций из включенных в исследование 68 полнотекстовых статей в каждом из актуальных направлений исследования за период с 2019 по 2024 гг.

Проведен детальный анализ 4-х исследований, посвященных терапии злокачественных новообразований с вовлечением ТМЕ (рис. 4). На основании анализа с использованием модели случайных эффектов с методом обратной дисперсии для сравнения коэффициента риска (HR) установлена статистическая разница: суммарный коэффициент риска (HR) составляет 65,4 с 95 % доверительным интервалом 49,75–85,98.

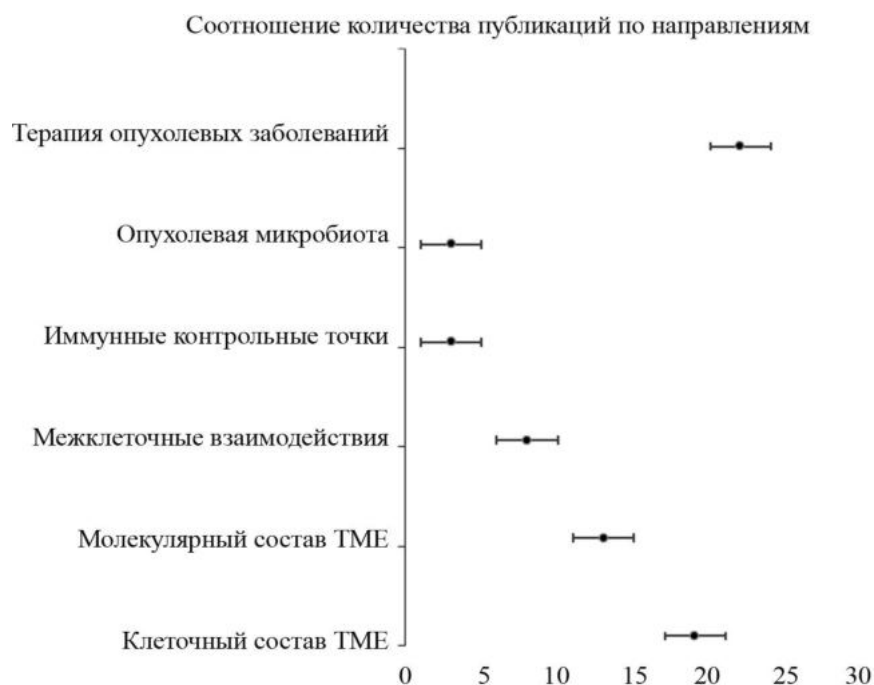


Рис. 3. Результаты систематического обзора

Fig. 3. Results of a systematic review

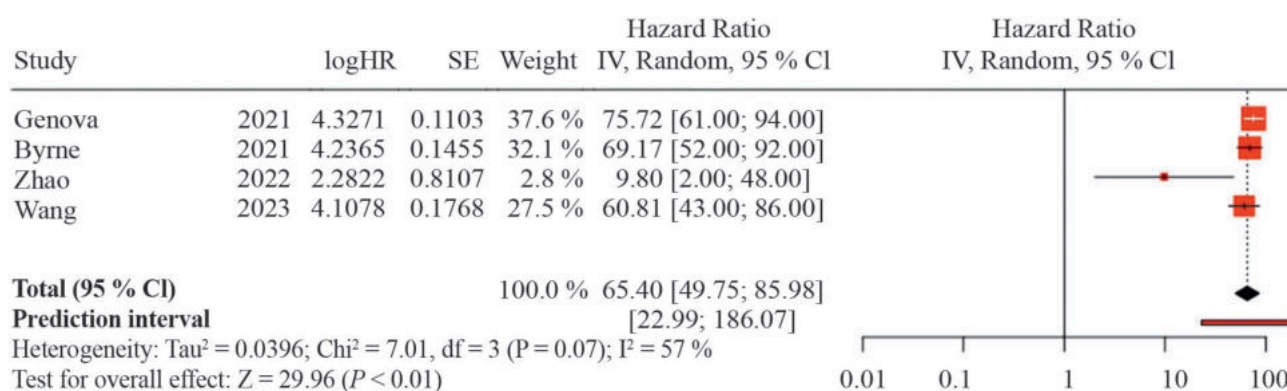


Рис. 4. Результаты систематического обзора, посвященного терапии опухолевых заболеваний

Fig. 4. The results of a systematic review on the treatment of tumor diseases

Примечание. HR – отношение рисков; SE – стандартная ошибка; Weight – вес или влияние исследования на общие результаты анализа всех включенных исследований; CI – доверительный интервал.

Note. HR – Hazard Ratio; SE – standard error; Weight – the weight or impact of the study on the overall results of the analysis of all included studies; CI – confidence interval.

Тест на общий эффект показывает значимость при $p < 0,05$. Обнаружена значительная гетерогенность (0,07), что предполагает непоследовательные эффекты по величине и/или направлению. Значение I^2 указывает на то, что 57 % изменчивости среди исследований возникает из-за гетерогенности, а не случайности.

Клеточный состав TME и TME-ориентированные методы терапии опухолевых заболеваний являются наиболее активно изучаемыми, в то время как иммунные контрольные точки и опухолевая микробиота при новообразованиях остаются наименее изученными областями, которым необходимо уделить большее внимание в планируемых исследованиях.

Заклучение

Итак, в результате систематического обзора выявлено: ТМЕ представляет собой достаточно сложную и гетерогенную структуру, широко вовлеченную в онкогенез, в том числе за счет активного взаимодействия опухолевых клеток с окружающими компонентами посредством кровеносной и лимфатической системы, что влияет на развитие и прогрессирование рака.

ТМЕ состоит из различных компонентов, включая опухолевые и иммунные клетки, молекулы, кровеносные и лимфатические сосуды, внеклеточный матрикс. Одним из распространенных типов иммунных клеток в ТМЕ являются цитотоксические CD8⁺ Т-клетки и НК-клетки, которые способны уничтожать опухолевые клетки [9]. Важным компонентом является внеклеточный матрикс, состоящий из сети макромолекул, включая гликопротеины, коллагены и ферменты, которые влияют на клеточную адгезию, пролиферацию и коммуникацию. Важное значение имеет экспрессия иммунных контрольных точек (PD-1, CTLA-4) для регуляции противоопухолевого сигнала [42].

Микробиота опухоли и микроорганизмы в ТМЕ влияют на биотрансформацию и метаболизм, которые определяют скорость роста и распространения опухолевых клеток в организме [45]. Протуморогенные процессы и молекулы в ТМЕ являются основными мишенями для новых методов лечения злокачественных новообразований, например, иммунотерапия опухоли с использованием антител против иммунных контрольных точек. Текущие клинические испытания направлены на таргетирование, устранение и перепрограммирование клеток в ТМЕ [57].

Глубокое понимание ТМЕ, его роли и связанные с ним молекулы позволят получить полное представление о биологическом поведении различных типов опухолей. Кроме того, такие данные станут важной основой для разработки терапевтических средств на основе ТМЕ и могут иметь решающее прогностическое значение, дополняя гистопатологические и молекулярные биомаркеры в отношении оценки эффективности лечения пациента с новообразованием.

Библиографические ссылки / References

1. Laumont CM, Nelson BH. B cells in the tumor microenvironment: Multi-faceted organizers, regulators, and effectors of anti-tumor immunity. *Cancer Cell*. 2023;41(3):466–489. DOI: 10.1016/j.ccell.2023.02.017.
2. Terren I, Orrantia A, Vitale J. NK Cell Metabolism and Tumor Microenvironment. *Frontiers in Immunology*. 2019;(10):1–9. DOI: 10.3389/fimmu.2019.02278.
3. Ben-Shmuel A, Biber G, Barda-Saad M. Unleashing Natural Killer Cells in the Tumor Microenvironment-The Next Generation of Immunotherapy? *Frontiers in Immunology*. 2020;11:1–23. DOI: 10.3389/fimmu.2020.00275.
4. Zheng Z, Wieder T, Mauerer B. T Cells in Colorectal Cancer: Unravelling the Function of Different T Cell Subsets in the Tumor Microenvironment. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(14):1–35. DOI: 10.3390/ijms241411673.
5. Li C, Jiang P, Wei S. Regulatory T cells in tumor microenvironment: new mechanisms, potential therapeutic strategies and future prospects. *Molecular Cancer*. 2020;19(1):1–23. DOI: 10.1186/s12943-020-01234-1.
6. Yan Y, Huang L, Liu Y. Metabolic profiles of regulatory T cells and their adaptations to the tumor microenvironment: implications for antitumor immunity. *Journal of Hematology & Oncology*. 2022;15(1):1–20. DOI: 10.1186/s13045-022-01322-3.
7. Arnetz B. Tumor Microenvironment. *Medicina*. 2019;56(1):1–15. DOI: 10.3390/medicina56010015.
8. Itahashi K, Irie T, Nishikawa H. Regulatory T-cell development in the tumor microenvironment. *European Journal of Immunology*. 2022;52(8):1216–1227. DOI: 10.1002/eji.202149358.
9. McFarlane AJ, Fercoq F, Coffelt SB. Neutrophil dynamics in the tumor microenvironment. *Journal of Clinical Investigation*. 2021;131(6):1–10. DOI: 10.1172/JCI143759.
10. Wu L, Saxena S, Singh RK. Neutrophils in the Tumor Microenvironment. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 2020;1224:1–20. DOI: 10.1007/978-3-030-35723-8_1.
11. Awasthi D, Sarode A. Neutrophils at the Crossroads: Unraveling the Multifaceted Role in the Tumor Microenvironment. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(5):1–22. DOI: 10.3390/ijms25052929.
12. Jeong J, Suh Y, Jung K. Context Drives Diversification of Monocytes and Neutrophils in Orchestrating the Tumor Microenvironment. *Frontiers in Immunology*. 2019;10:1–20. DOI: 10.3389/fimmu.2019.01817.
13. Messex JK, Byrd CJ, Liou GY. Signaling of Macrophages that Contours the Tumor Microenvironment for Promoting Cancer Development. *Cells*. 2020;9(4):1–15. DOI: 10.3390/cells9040919.
14. Chen D, Zhang X, Li Z. Metabolic regulatory crosstalk between tumor microenvironment and tumor-associated macrophages. *Theranostics*. 2021;11(3):1016–1030. DOI: 10.7150/thno.51777.
15. Boutilier AJ, ElSawa SF. Macrophage Polarization States in the Tumor Microenvironment. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(13):1–21. DOI: 10.3390/ijms22136995.
16. Wang H, Yung MH, Ngan HS. The Impact of the Tumor Microenvironment on Macrophage Polarization in Cancer Metastatic Progression. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(12):1–19. DOI: 10.3390/ijms22126560.
17. Hinshaw DC, Shevde LA. The Tumor Microenvironment Innately Modulates Cancer Progression. *Cancer Research*. 2019;79(18):4557–4566. DOI: 10.1158/0008-5472.CAN-18-3962.
18. Haas L, Obenaus AC. Allies or Enemies-The Multifaceted Role of Myeloid Cells in the Tumor Microenvironment. *Frontiers in Immunology*. 2019;10:1–11. DOI: 10.3389/fimmu.2019.02746.
19. Patwardhan MV, Mahendran R. The Bladder Tumor Microenvironment Components That Modulate the Tumor and Impact Therapy. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(15):1–24. DOI: 10.3390/ijms241512311.

20. Frisbie L, Buckanovich RJ, Coffman L. Carcinoma-Associated Mesenchymal Stem/Stromal Cells: Architects of the Pro-tumorigenic Tumor Microenvironment. *Stem Cells*. 2022;40(8):705–715. DOI: 10.1093/stmcls/sxsc036.
21. Barthel L, Hadamitzky M, Dammann P. Glioma: molecular signature and crossroads with tumor microenvironment. *Cancer and Metastasis Reviews*. 2022;41(1):53–75. DOI: 10.1007/s10555-021-09997-9.
22. Habanjar O, Bingula R, Decombat C. Crosstalk of Inflammatory Cytokines within the Breast Tumor Microenvironment. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(4):1–40. DOI: 10.3390/ijms24044002.
23. Niland S, Riscanevo AX, Eble JA. Matrix Metalloproteinases Shape the Tumor Microenvironment in Cancer Progression. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;23(1):146. DOI: 10.3390/ijms23010146.
24. Waldner MJ, Neurath MF. TGF β and the Tumor Microenvironment in Colorectal Cancer. *Cells*. 2023;12(8):1–14. DOI: 10.3390/cells12081139.
25. Liu K, Huang A, Nie J. IL-35 Regulates the Function of Immune Cells in Tumor Microenvironment. *Frontiers in Immunology*. 2021;12:1–10. DOI: 10.3389/fimmu.2021.683332.
26. Ene CV, Nicolae I, Geavlete B. IL-6 Signaling Link between Inflammatory Tumor Microenvironment and Prostatic Tumorigenesis. *Analytical Cellular Pathology*. 2022;22:1–10. DOI: 10.1155/2022/5980387.
27. Codrici E, Popescu ID, Tanase C. Friends with Benefits: Chemokines, Glioblastoma-Associated Microglia/Macrophages, and Tumor Microenvironment. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(5):1–36. DOI: 10.3390/ijms23052509.
28. Kadomoto S, Izumi K, Mizokami A. Roles of CCL2-CCR2 Axis in the Tumor Microenvironment. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(16):1–15. DOI: 10.3390/ijms22168530.
29. Bule P, Aguiar SI, Aires-Da-Silva F. Chemokine-Directed Tumor Microenvironment Modulation in Cancer Immunotherapy. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(18):1–25. DOI: 10.3390/ijms22189804.
30. Knipper K, Lyu SI, Quaas A. Cancer-Associated Fibroblast Heterogeneity and Its Influence on the Extracellular Matrix and the Tumor Microenvironment. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(17):1–21. DOI: 10.3390/ijms241713482.
31. Karagiannidis I, Salataj E, Said Abu Egal E. G-CSF in tumors: Aggressiveness, tumor microenvironment and immune cell regulation. *Cytokine*. 2021;142:1–15. DOI: 10.1016/j.cyto.2021.155479.
32. Osipov A, Saung MT, Zheng L. Small molecule immunomodulation: the tumor microenvironment and overcoming immune escape. *Journal for Immunotherapy of Cancer*. 2019;7(1):1–12. DOI: 10.1186/s40425-019-0667-0.
33. SenGupta S, Hein LE, Parent CA. The Recruitment of Neutrophils to the Tumor Microenvironment Is Regulated by Multiple Mediators. *Frontiers in Immunology*. 2021;12:1–10. DOI: 10.3389/fimmu.2021.734188.
34. Jiang Z, Zhou J, Li L. Pericytes in the tumor microenvironment. *Cancer Letters*. 2023;556:1–21. DOI: 10.1016/j.canlet.2023.216074.
35. Almeida-Nunes DL, Mendes-Frias A, Silvestre R. Immune Tumor Microenvironment in Ovarian Cancer Ascites. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(18):1–23. DOI: 10.3390/ijms231810692.
36. Ducimetiee L, Vermeer M, Tugues S. The Interplay Between Innate Lymphoid Cells and the Tumor Microenvironment. *Frontiers in Immunology*. 2019;10:1–11. DOI: 10.3389/fimmu.2019.02895.
37. Rossi GR, Trindade ES, Souza-Fonseca-Guimaraes F. Tumor Microenvironment-Associated Extracellular Matrix Components Regulate NK Cell Function. *Frontiers in Immunology*. 2020;11:1–10. DOI: 10.3389/fimmu.2020.00073.
38. Mun JY, Leem SH, Lee JH. Dual Relationship Between Stromal Cells and Immune Cells in the Tumor Microenvironment. *Frontiers in Immunology*. 2022;13:1–15. DOI: 10.3389/fimmu.2022.864739.
39. Sato A, Rahman NA, Shimizu A. Cell-to-cell contact-mediated regulation of tumor behavior in the tumor microenvironment. *Cancer Science*. 2021;112(10):4005–4012. DOI: 10.1111/cas.15114.
40. Wei R, Liu S, Zhang S. Cellular and Extracellular Components in Tumor Microenvironment and Their Application in Early Diagnosis of Cancers. *Analytical Cellular Pathology*. 2020;20:1–13. DOI: 10.1155/2020/6283796.
41. Yi M, Niu M, Xu L. Regulation of PD-L1 expression in the tumor microenvironment. *Journal of Hematology & Oncology*. 2021;14(1):1–10. DOI: 10.1186/s13045-020-01027-5.
42. Simiczjew A, Dratkiewicz E, Mazurkiewicz J. The Influence of Tumor Microenvironment on Immune Escape of Melanoma. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(21):1–28. DOI: 10.3390/ijms21218359.
43. Capitani N, Patrussi L, Baldari CT. The Two Opposing Behaviors of Cytotoxic T Lymphocytes in the Tumor Microenvironment. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(20):1–20. DOI: 10.3390/ijms222011221.
44. Deng R, Zheng H, Cai H. Effects of helicobacter pylori on tumor microenvironment and immunotherapy responses. *Frontiers in Immunology*. 2022;13:P. 1–15. DOI: 10.3389/fimmu.2022.923477.
45. Wong-Rolle A, Wei HK, Zhao C. Unexpected guests in the tumor microenvironment: microbiome in cancer. *Protein & Cell*. 2021;12(5):426–435. DOI: 10.1007/s13238-020-00813-8.
46. Jiang T, Yang T, Chen Y. Emulating interactions between microorganisms and tumor microenvironment to develop cancer theranostics. *Theranostics*. 2022;12(6):2833–2859. DOI: 10.7150/thno.70719.
47. Genova C, Dellepiane C, Carrega P. Therapeutic Implications of Tumor Microenvironment in Lung Cancer: Focus on Immune Checkpoint Blockade. *Frontiers in Immunology*. 2022;12:1–22. DOI: 10.3389/fimmu.2021.799455.
48. Liu G, Rui W, Zhao X. Enhancing CAR-T cell efficacy in solid tumors by targeting the tumor microenvironment. *Cellular & Molecular Immunology*. 2021;18(5):1085–1095. DOI: 10.1038/s41423-021-00655-2.
49. Wang Q, Shao X, Zhang Y. Role of tumor microenvironment in cancer progression and therapeutic strategy. *Cancer Medicine*. 2023;12(10):11149–11165. DOI: 10.1002/cam4.5698.
50. Petitprez F, Meylan M, de ReyniEs A. The Tumor Microenvironment in the Response to Immune Checkpoint Blockade Therapies. *Frontiers in Immunology*. 2020;11:1–11. DOI: 10.3389/fimmu.2020.00784.
51. Liu Y, Li C, Lu Y. Tumor microenvironment-mediated immune tolerance in development and treatment of gastric cancer. *Frontiers in Immunology*. 2022;13:1–17. DOI: 10.3389/fimmu.2022.1016817.
52. Lu C, Rong D, Zhang B. Current perspectives on the immunosuppressive tumor microenvironment in hepatocellular carcinoma: challenges and opportunities. *Molecular Cancer*. 2019;18(1):1–12. DOI: 10.1186/s12943-019-1047-6.
53. Byrne KT. Neoadjuvant Selicrelumab, an Agonist CD40 Antibody, Induces Changes in the Tumor Microenvironment in Patients with Resectable Pancreatic Cancer. *Clinical Cancer Research*. 2021;27(16):4574–4586. DOI: 10.1158/1078-0432.CCR-21-1047.

54. Jedlicka M, Feglarova T, Janstova L. Lactate from the tumor microenvironment - A key obstacle in NK cell-based immunotherapies. *Frontiers in Immunology*. 2022;13:1–9. DOI: 10.3389/fimmu.2022.932055.
55. Jia H, Yang H, Xiong H. NK cell exhaustion in the tumor microenvironment. *Frontiers in Immunology*. 2023;14:1–8. DOI: 10.3389/fimmu.2023.1303605.
56. Madeddu C, Donisi C, Liscia N. EGFR-Mutated Non-Small Cell Lung Cancer and Resistance to Immunotherapy: Role of the Tumor Microenvironment. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(12):1–16. DOI: 10.3390/ijms23126489.
57. Zhang Z, Li X, Wang Y. Involvement of inflammasomes in tumor microenvironment and tumor therapies. *Journal of Hematology & Oncology*. 2023;16(1):1–24. DOI: 10.1186/s13045-023-01407-7.
58. Zhao Y, Guo S, Deng J. VEGF/VEGFR-Targeted Therapy and Immunotherapy in Non-small Cell Lung Cancer: Targeting the Tumor Microenvironment. *International Journal of Biology Sciences*. 2022;18(9):3845–3858. DOI: 10.7150/ijbs.70958.
59. Peng X, He Y, Huang J. Metabolism of Dendritic Cells in Tumor Microenvironment: For Immunotherapy. *Frontiers in Immunology*. 2021;12:1–16. DOI: 10.3389/fimmu.2021.613492.
60. Garra CS, Luke JJ. Dendritic Cells, the T-cell-inflamed Tumor Microenvironment, and Immunotherapy Treatment Response. *Clinical Cancer Research*. 2020;26(15):3901–3907. DOI: 10.1158/1078-0432.CCR-19-1321.
61. Jang H, Kim EH, Chi SG. Nanoparticles Targeting Innate Immune Cells in Tumor Microenvironment. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(18):1–20. DOI: 10.3390/ijms221810009.
62. Raju GR, Pavitra E, Varaprasad GL. Nanoparticles mediated tumor microenvironment modulation: current advances and applications. *Journal of Nanobiotechnology*. 2022;20(1):1–20. DOI: 10.1186/s12951-022-01476-9.
63. Ghaffari S, Rezaei N. Eosinophils in the tumor microenvironment: implications for cancer immunotherapy. *Journal of Translational Medicine*. 2023;21(1):1–23. DOI: 10.1186/s12967-023-04418-7.
64. Grisaru-Tal S, Rothenberg ME, Munitz A. Eosinophil-lymphocyte interactions in the tumor microenvironment and cancer immunotherapy. *Nature Immunology*. 2022;23(9):1309–1316. DOI: 10.1038/s41590-022-01291-2.
65. Xu Y, Li W, Lin S. Fibroblast diversity and plasticity in the tumor microenvironment: roles in immunity and relevant therapies. *Journal of Cell Communication and Signaling*. 2023;21(1):1–19. DOI: 10.1186/s12964-023-01204-2.
66. Shen KY, Zhu Y, Xie SZ. Immunosuppressive tumor microenvironment and immunotherapy of hepatocellular carcinoma: current status and perspectives. *Journal of Hematology & Oncology*. 2024;17(1):1–25. DOI: 10.1186/s13045-024-01549-2.
67. Johnson A, Townsend M, Neill K. Tumor Microenvironment Immunosuppression: A Roadblock to CAR T-Cell Advancement in Solid Tumors. *Cells*. 2022;11(22):1–19. DOI: 10.3390/cells11223626.
68. Liu S, Wang W, Hu S. Radiotherapy remodels the tumor microenvironment for enhancing immunotherapeutic sensitivity. *Cell Death and Disease*. 2023;14(10):1–16. DOI: 10.1038/s41419-023-06211-2.

Статья поступила в редколлегию 13.08.2024.
Received by editorial board 13.08.2024.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 504.064.2:631.41(476)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОДЕРЖАНИЯ СУЛЬФАТОВ И НИТРАТОВ В ПОЧВАХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

С. Е. ГОЛОВАТЫЙ¹⁾, С. В. САВЧЕНКО²⁾, Е. А. САМУСИК³⁾, М. Л. СИНИЦКАЯ²⁾

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

²⁾Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси,
ул. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь

³⁾Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
ул. Элизы Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

Образец цитирования:

Головатый СЕ, Савченко СВ, Самусик ЕА, Сеницкая МЛ.
Пространственно-временные особенности содержания сульфатов и нитратов в почвах урбанизированных территорий.
Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2024;4:99–113.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-99-113>

For citation:

Golovaty SE, Savchenko SV, Samusik EA, Sinitskaya ML.
Spatiotemporal peculiarities of sulfate and nitrate concentration in soils of urbanized areas. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;4:99–113. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-4-99-113>

Авторы:

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

Светлана Валентиновна Савченко – кандидат геолого-минералогических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории оптимизации геосистем.

Елена Андреевна Самусик – старший преподаватель кафедры экологии.

Марина Леонидовна Сеницкая – младший научный сотрудник лаборатории трансграничного загрязнения.

Authors:

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

sscience@yandex.ru

Svetlana V. Savchenko, PhD (geology and mineralogy), docent; leading researcher at the laboratory of geosystems optimization.

svscience@rambler.ru

Elena A. Samusik, senior lecturer at the department of ecology.

e.samusik@mail.ru

Marina L. Sinitskaya, junior researcher at the laboratory of transboundary pollution.

marina.si.mary@gmail.com

Оценка современного состояния почв городских территорий выявила пространственные различия в накоплении нитратов и сульфатов по административным областям страны. Наименьшие концентрации нитратов отмечены в городах Брестской обл. ($K_c = 0,5$), наибольшие – в Гомельской ($K_c = 2,8$). Для сульфатов наблюдалась обратная тенденция: наименьшее среднее содержание зафиксировано в городах Гомельской обл. ($K_c = 1,0$), наибольшее – в Брестской ($K_c = 1,5$). При этом различия в накоплении сульфатов по областям незначительные, в то время как для нитратов разброс средних значений составил более чем в 5 раз. Максимальные значения сульфатов, отмеченные на отдельных участках городов, составили от $> 1,0$ до $3,0$ ПДК. Исследования показали, что за 2000–2020 гг. в 90 % населенных пунктов отмечена тенденция снижения концентрации нитратов в почвах городов. Можно предположить, что такое уменьшение азотсодержащих веществ обусловлено снижением количества органического вещества в почвах и замедлением процессов нитрификации при его разложении, а также незначительной долей азотфиксирующих организмов, присутствующих в городских почвах. Установлено, что за исследуемый период содержание сульфатов в почвах городов увеличилось. При этом в 59 % случаев почвы характеризовались значительным увеличением содержания сульфатов: в 41 % случаев накопление серосодержащего соединения в почвах незначительное. В почвах г. Минска за 2000–2022 гг. установлены разнонаправленные свойства в содержании нитратов по годам с общей тенденцией к значительному понижению их концентрации. Для сульфатов отмечалась некоторое накопление в почвах с незначительным снижением концентраций в 2013 и 2015 гг. Следовательно, можно прогнозировать ухудшение экологического состояния почв в 94 % исследованных населенных пунктов за счет увеличения в них концентрации сульфатов и положительную тенденцию, выраженную в снижении или стабилизации накопления нитратов в почвенном покрове городских территорий.

Ключевые слова: почвы; сульфаты; нитраты; городские территории; загрязнение; динамика; предельно допустимая концентрация; фоновое содержание; пороговое значение.

SPATIOTEMPORAL PECULIARITIES OF SULFATE AND NITRATE CONCENTRATION IN SOILS OF URBANIZED AREAS

S. E. GOLOVATYI^a, S. V. SAVCHENKO^b, E. A. SAMUSIK^c, M. L. SINITSKAYA^b

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

*^bInstitute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,
10 Surganova Street, Minsk 220076, Belarus*

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

Corresponding author: S. E. Golovaty (ssience@yandex.ru)

Assessment of the current state of soils of urban areas revealed spatial differences in the accumulation of nitrates and sulfates by administrative regions of the country. The lowest nitrate concentrations were observed in the cities of Brest region ($K_c = 0.5$), the highest – in Gomel region ($K_c = 2.8$). The opposite trend was observed for sulfates: the lowest average content was recorded in the cities of Gomel region ($K_c = 1.0$), the highest – in Brest region ($K_c = 1.5$). At the same time, the differences in the accumulation of sulphates by regions are insignificant, while for nitrates the variation of average values amounted to more than 5 times. Maximum values of sulphates observed in some parts of the cities were from > 1.0 to 3.0 maximum permissible concentrations. Studies have shown that over the period 2000–2020, 90 % of populated areas showed a tendency to decrease to concentration nitrates in urban soils. It can be assumed that such a decrease in nitrogen-containing substances is due to a decrease in the amount of organic matter in soils and slowing down of nitrification processes during its decomposition, as well as an insignificant proportion of nitrogen-fixing organisms present in urban soils. It was found that over the study period, the content of sulfates in urban soils increased. At the same time, in 59 % of cases, soils were characterized by a significant increase in the content of sulfates, in 41 % of cases, the accumulation of sulfur-containing compounds in soils was insignificant. In the soils of Minsk for the period 2000–2022, multidirectional trends in the content of nitrates were established by year with a general tendency towards a significant decrease in their concentration. For sulfates, some accumulation was noted in soils with an insignificant decrease in concentrations in 2013 and 2015. In general, it is possible to predict a deterioration in the ecological state of soils in 94 % of the studied settlements due to an increase in the concentration of sulfates in them and a positive trend expressed in a decrease or stabilization of the accumulation of nitrates in the soil cover of urban areas.

Keywords: soils; sulfates; nitrates; urban areas; pollution; dynamics; maximum permissible concentration; background content; threshold value.

Введение

На территории Беларуси эколого-геохимические исследования почв урбанизированных территорий на содержание в них химических веществ и показателей проводятся с середины XX в. Чаще всего изучались тяжелые металлы и нефтепродукты, выступающие основными загрязнителями городских почв. Оценке присутствия серо- и азотсодержащих соединений в почвах городов уделялось значительно меньше внимания, так как эта область исследований касается главным образом сельскохозяйственных земель, для которых наличие в почвах азота и серы являются обязательным условием получения качественной растениеводческой продукции [1–7]. В естественных условиях обогащение почв нитратами происходит в процессе нитрификации при разложении органических веществ почвы, а также вследствие отмирания азотфиксирующих микроорганизмов [8].

Сульфатная форма серы образуется с участием микроорганизмов в качестве побочного продукта в процессе минерализации органического вещества почвы, представленного растительными остатками и гумусом. Незначительная часть от валового содержания серы в почве находится в неорганической форме в виде сульфатов, которые входят в состав почвенного раствора, удерживаются поверхностью минеральных частиц почвы, а также находятся в составе отдельных минералов [8].

Дополнительное поступление серы и азота в почвы городских территорий, по сравнению с природными аналогами, может быть обусловлено их присутствием в атмосферном воздухе городов в виде оксидов серы и азота, которые входят в группу газов, обладающих высокой химической активностью, и поступают в атмосферу при сгорании ископаемых видов топлива, деятельности промышленных объектов и выбросах автотранспорта [1–3]. Поступившие из атмосферы техногенные соединения серы могут закрепляться в почве в результате адсорбции в виде нерастворимых соединений, что ограничивает их миграцию. В то же время большинство сульфатов и нитратов хорошо растворимы в воде, что способствует их вымыванию из поверхностного слоя почв в нижележащие горизонты [8].

В статье дается оценка содержания сульфатов и нитратов в городских почвах по результатам обследования городов в рамках наблюдений за химическим загрязнением почв Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь (НСМОС) (по данным последнего тура обследования города), а также изменений концентраций данных веществ в почвах городских территорий, произошедших за более чем двадцатилетний период (2000–2022)¹.

Материалы и методы исследования

При наблюдениях за химическим загрязнением земель урбанизированных территорий, проводимых в рамках НСМОС, сульфаты и нитраты входят в обязательный перечень наблюдаемых в почвах городов показателей.

Исследуемыми в рамках НСМОС территориями являются г. Минск и областные центры Беларуси, города с населением 50 тыс. чел. и более, а также населенные пункты, где размещены потенциальные источники поступления в почвенный покров загрязняющих веществ.

Согласно «Инструкции о порядке проведения наблюдений за химическим загрязнением земель», для оценки состояния почв город делится на ячейки по ортогональной сетке, охватывающей всю территорию населенного пункта, со сторонами, кратными 1 км, и площадью ячеек не более 4 км². В точках пересечения диагоналей каждой ячейки располагаются пункты наблюдений (размер пункта наблюдений 100 м × 100 м), где производится отбор проб почв. Наблюдения в населенных пунктах проводятся таким образом, чтобы за тур обследования были изучены почвы на всех пунктах наблюдений в пределах городской территории.

Определение нитратов и сульфатов в отобранных почвенных образцах проводится в аккредитованных на выполнение данного вида работ лабораториях и центрах.

Подходы к оценке экологического состояния почв на городской территории. Для оценки экологического состояния почв городских земель традиционно используются фактические значения содержания химических веществ в почвах (мг/кг)², коэффициент концентрации (Кс), гигиенические нормативы (предельно допустимые концентрации (ПДК))³ и экологические нормативы (пороговые значения для различных по гранулометрическому составу почв) (табл. 1) [9].

¹Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь, 2000–2023 гг. [Электронный ресурс]. Минск, 2000–2023. URL: nsmos.by/content/402.html (дата обращения: 16.03.2024).

²ЭкоНП 17.03.01-001-2021. Охрана окружающей среды и природопользование. Земли (в том числе почвы). Нормативы качества окружающей среды. Дифференцированные нормативы содержания химических веществ в почвах и требования к их применению. Введ. 01.07.2022. Минск : Минприроды, 2021. 34 с.

³Об утверждении гигиенических нормативов: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 25 января 2021 г. № 37 [Электронный ресурс]. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100037> (дата обращения: 23.03.2024).

Таблица 1

Предельно допустимые концентрации и пороговые значения содержания
сульфатов и нитратов в почвах (грунтах) населенных пунктов, мг/кг

Table 1

Maximum permissible concentrations and threshold values for the content of sulfates and nitrates in soils of populated areas, mg/kg

Почва (грунт)		Нитраты	Сульфаты
Пороговое значение содержания химического вещества	Песчаная	136	214
	Супесчаная	210	330
	Суглинистая	259	408
Предельно допустимая концентрация (ПДК)		130,0	160,0

Коэффициент концентрации (K_c) показывает изменения в химическом составе почв по сравнению с природными аналогами и определяется как отношение фактического содержания химического вещества в почве конкретной территории к его фоновому содержанию:

$$K_c = C_i / C_{\text{фон}},$$

где C_i – фактическое содержание элемента;
 $C_{\text{фон}}$ – геохимический фон.

В соответствии с целями данного исследования в качестве фона для оценки почв урбанизированных территорий использовались данные НСМОС для фоновых территорий в разрезе административных областей за 2018–2022 гг. с учетом расположения города в конкретной административной области (табл. 2).

Таблица 2

Содержание нитратов и сульфатов в почвах фоновых территорий административных областей Беларуси,
по данным 2018–2022 гг.

Table 2

Background content of nitrates and sulfates in soils of background territories of administrative regions of Belarus
to data from 2018–2022 years

Административная область	Среднее содержание химических веществ, мг/кг	
	NO ₃	SO ₄
Брестская	10,5	73,7
Витебская	18,4	59,7
Гомельская	10,7	65,9
Гродненская	9,9	54,4
Минская	11,0	55,2
Могилевская	6,2	51,5
Среднее по Республике Беларусь	11,1	57,3

На основе ПДК и пороговых значений оценивается степень загрязнения почв (при его наличии).

Пороговые значения выступают основой для установления дифференцированных нормативов, которые определяют степень загрязнения почв для различных категорий земель и функциональных зон в пределах населенных пунктов.

В настоящем исследовании в качестве пороговых значений в связи с использованием усредненных величин содержания нитратов и сульфатов в почвах городов принимались наименьшие значения, установленные для песчаных почв земель населенных пунктов: для нитратов – 136 мг/кг, сульфатов – 214 мг/кг⁴.

Современное состояние почв в городах Беларуси. Оценка современного состояния почв в отдельных городах Беларуси, которые входят в перечень населенных пунктов, где проводились/проводятся наблюдения за химическим загрязнением почвенного покрова, свидетельствует, что в разрезе административных областей наименьшая средняя концентрация нитратов отмечена в городах Брестской обл. с $K_c = 0,5$ (K_c рассчитывался по среднему фоновому значению, установленному для почв Беларуси), наибольшая –

⁴ЭкоНП 17.03.01-001-2021. Охрана окружающей среды и природопользование. Земли (в том числе почвы). Нормативы качества окружающей среды. Дифференцированные нормативы содержания химических веществ в почвах и требования к их применению. Введ. 01.07.2022. Минск: Минприроды, 2021. 34 с.

в Гомельской, $K_c = 2,8$. Для сульфатов наблюдалась обратная тенденция: наименьшее среднее содержание зафиксировано в почвах городов Гомельской обл., $K_c = 1,0$, наибольшее – в Брестской, $K_c = 1,5$. При этом различия в накоплении сульфатов по областям незначительные, в то время как для нитратов разброс средних для областей значений составил 5,7 раза (табл. 3).

Таблица 3

Содержание нитратов и сульфатов в почвах городов административных областей Беларуси

Table 3

Content of nitrates and sulfates in urban soils of administrative regions of Belarus

Административная область	Содержание химических веществ, мг/кг					
	среднее	минимальное	максимальное	среднее	минимальное	максимальное
	NO ₃			SO ₄		
Брестская	5,4	< п. о.	36,4	84,7	35,4	166,2
Витебская	21,5	< п. о.	54,2	62,8	18,6	202,5
Гомельская	30,8	< п. о.	63,8	58,2	22,4	133,2
Гродненская	21,2	< п. о.	50,1	63,2	31,1	120,2
Минская	21,6	< п. о.	60,4	69,5	27,5	140,2
Могилевская	11,4	< п. о.	27,8	60,6	28,3	140,0

Максимальная для областей концентрация нитратов также отмечена в городских почвах Гомельской обл., $K_c = 5,7$, сульфатов – в Витебской и Брестской, $K_c = 3,5$ и $K_c = 2,9$ соответственно и превышением ПДК в 1,0–1,3 раза.

На территории городов *Брестской обл.* среднее содержание нитратов в городских почвах ниже фона, полученного при мониторинге земель на фоновых территориях Брестской обл., с наименьшим средним значением в Белоозерске, $K_c = 0,2$, наибольшим – в Пинске, $K_c = 0,7$ (табл. 4).

Таблица 4

Содержание нитратов и сульфатов в почвах городов Брестской обл.

Table 4

Content of nitrates and sulfates in soils of cities of the Brest region

Город, год	Содержание химических веществ, мг/кг					
	среднее	минимальное	максимальное	среднее	минимальное	максимальное
	NO ₃			SO ₄		
Барановичи, 2018	4,7	< п. о.	15,5	98,2	34,6	173,9
Белоозерск, 2018	2,2	< п. о.	3,6	39,9	11,5	69,6
Брест, 2022	5,1	< п. о.	51,3	66,7	25,5	131,6
Дрогичин, 2009	6,9	3,8	21,9	85,1	52,6	161,1
Кобрин, 2019	5,5	< п. о.	18,6	105,0	55,2	193,1
Лунинец, 2019	6,1	< п. о.	43,6	95,1	27,4	270,4
Пинск, 2017	7,1	< п. о.	100,0	103,1	40,8	163,8
Фоновое значение	10,5			73,7		
ПДК	130,0			160,0		
Пороговое значение	136,0			214,0		

Примечания. Жирным шрифтом – значение выше гигиенического норматива; < п. о. – ниже предела обнаружения метода определения.

Разброс значений максимальных концентраций нитратов по отдельным городам составил более чем 30 раз с наибольшим значением в почвах на одном из участков в г. Пинске с $K_c = 9,5$. Превышений над ПДК или пороговым значением ни в одном из городов не отмечено (рис. 1).

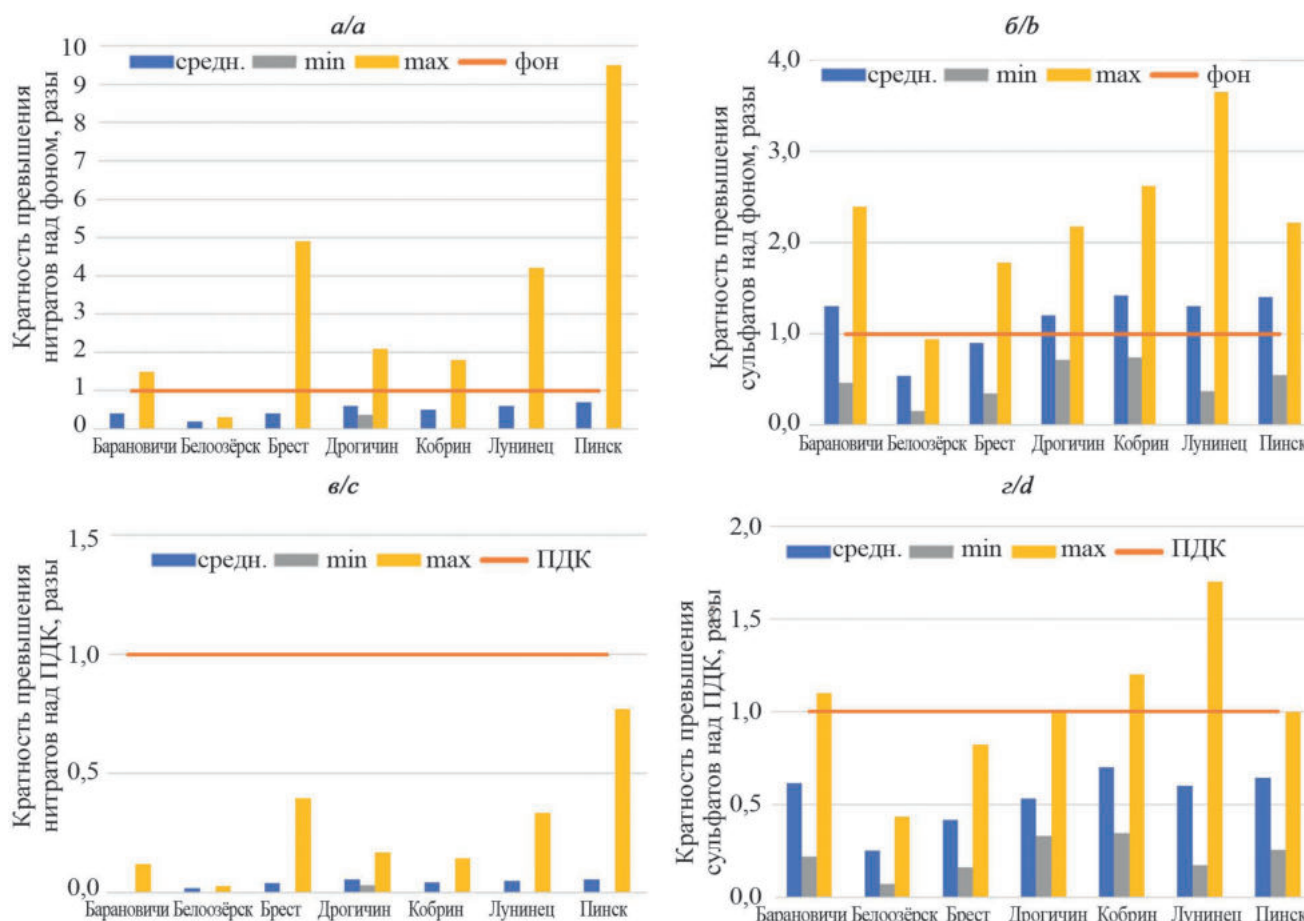


Рис. 1. Кратность превышения содержания нитратов и сульфатов в почвах городов Брестской обл.:
а и б – над фоновым значением, в и г – над ПДК

Fig. 1. Multiplicity of excess of the content of nitrates and sulfates in the soils of the cities of the Brest region:
a and b – above the background value, c and d – above the MPC

Наибольшее среднее по городу содержание сульфатов зафиксировано в г. Кобрине, $K_c = 1,4$, наименьшее в г. Белоозёрске – $K_c = 0,5$. Превышение над фоном отмечено в почвах пяти городов.

Наименьшие зафиксированные в почвах содержания сульфатов ни в одном из городов не достигли фоновое значения. Коэффициенты концентрации максимальных значений составили от $K_c = 0,9$ в г. Белоозёрске до $K_c = 3,7$ в г. Лунинце. При этом превышение над гигиеническими нормативами зафиксировано в почвах пяти городов – от $>1,0$ до $1,7$ ПДК, в г. Лунинце отмечено превышение порогового значения с низкой степенью загрязнения почв (см. рис. 1).

Обследование почв городов **Витебской обл.** показало, что разброс средних значений содержания нитратов составил $19,2$ раза, K_c от $0,2$ в г. Новолукомле до $4,3$ в г. Лепеле. В половине обследованных населенных пунктов среднее по городу содержание нитратов ниже фона для почв Витебской обл. (табл. 5, рис. 2).

Максимальное содержание нитратов составило от $K_c = 0,4$ в г. Новолукомле до $K_c = 6,7$ в г. Лепеле. Превышений над гигиеническими и экологическими нормативами в почвах на территории городов Витебской обл. отмечено не было.

Среднее содержание сульфатов в почвах городов Витебской обл. изменялось незначительно от $K_c = 0,5$ в г. Лепеле до $K_c = 1,4$ в г. Витебске (см. рис. 2). Наименьшие концентрации вещества значительно ниже фона во всех обследованных городах. Коэффициенты концентрации для максимальных значений, зафиксированных в городах, составили от $K_c = 1,6$ в г. Лепеле до $K_c = 8,0$ в г. Новополоцке.

Превышение гигиенического норматива для сульфатов отмечено в почвах трех населенных пунктов – от $>1,0$ в г. Полоцке до $3,0$ ПДК в г. Новополоцке, порогового значения – в г. Новополоцке в пределах, определяющих низкую степень загрязнения почв.

В почвах городов **Гомельской обл.** разброс значений среднего содержания нитратов составил более 26 раз, $K_c = 0,4$ в г. Мозыре до $K_c = 9,5$ в г. Буда-Кошелево. Накопление нитратов выше фона, установленного для почв Гомельской обл., отмечено в большинстве обследованных городов (табл. 6, рис. 3).

Таблица 5

Содержание нитратов и сульфатов в почвах городов Витебской обл.

Table 5

Content of nitrates and sulfates in soils of cities of the Vitebsk region

Город, год	Содержание химических веществ, мг/кг					
	среднее	минимальное	максимальное	среднее	минимальное	максимальное
	NO ₃			SO ₄		
Витебск, 2022	6,0	< п. о.	69,2	86,0	9,6	191,2
Лепель, 2010	79,2	29,8	123,5	31,2	15,9	93,9
Новолукомль, 2019	4,0	< п. о.	8,1	59,4	22,1	137,9
Новополоцк, 2021	22,5	< п. о.	56,2	77,6	31,2	478,0
Орша, 2021	9,8	< п. о.	30,2	67,2	22,1	150,8
Полоцк, 2020	7,6	< п. о.	38,0	55,3	10,6	163,3
Фоновое значение	18,4			59,7		
ПДК	130,0			160,0		
Пороговое значение	136,0			214,0		

Примечания. Жирным шрифтом – значение выше гигиенического норматива; < п. о. – ниже предела обнаружения метода определения.

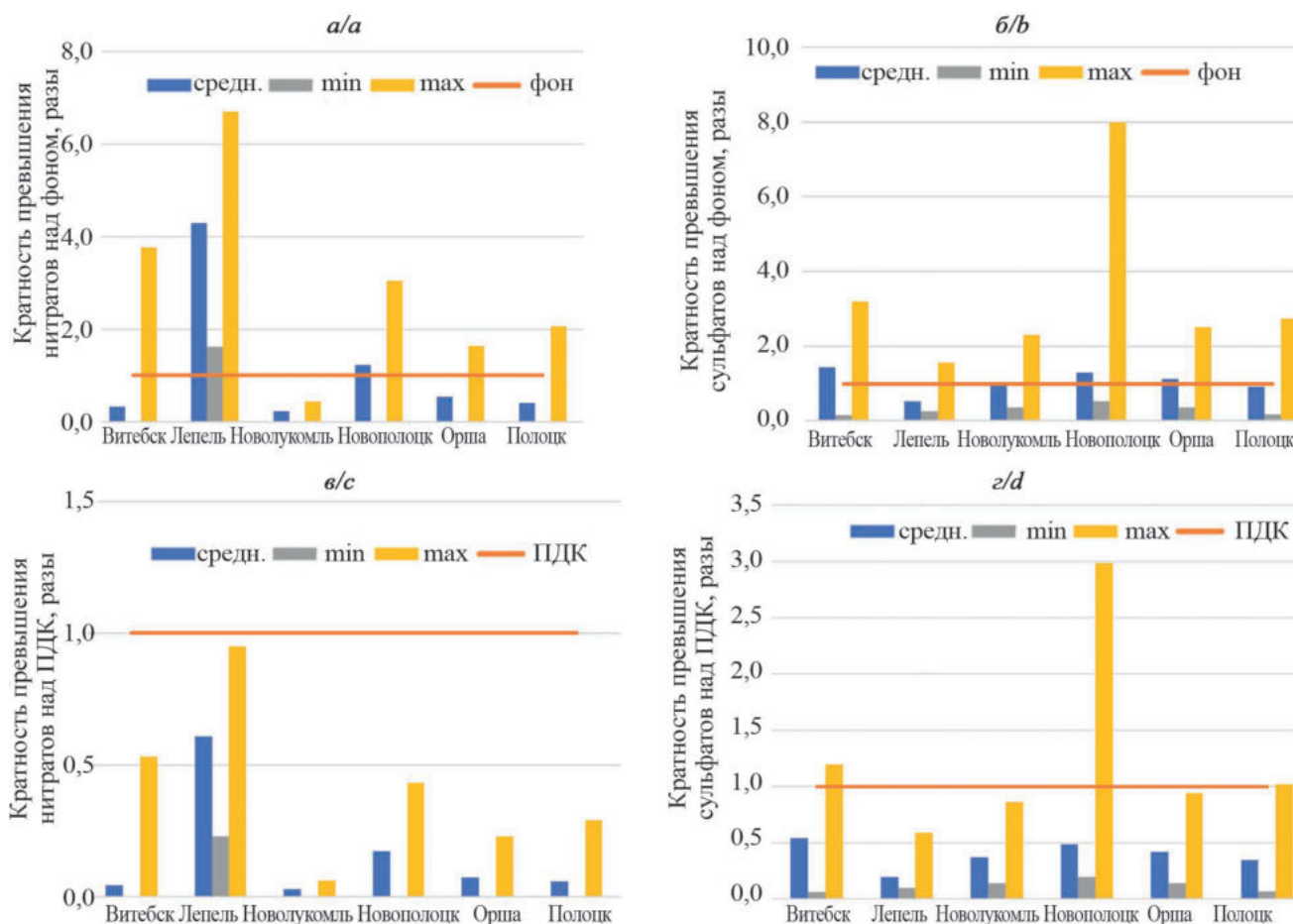


Рис. 2. Кратность превышения содержания нитратов и сульфатов в почвах городов Витебской обл.: а и б – над фоновым значением, в и г – над ПДК

Fig. 2. Multiplicity of excess of the content of nitrates and sulfates in the soils of the cities of the Vitebsk region: а and б – above the background value, в and г – above the MPC

Таблица 6

Содержание нитратов и сульфатов в почвах городов Гомельской обл.

Table 6

Content of nitrates and sulfates in soils of cities of the Gomel region

Город, год	Содержание химических веществ, мг/кг					
	среднее	минимальное	максимальное	среднее	минимальное	максимальное
	NO ₃			SO ₄		
Буда-Кошелево, 2009	101,7	79,4	109,0	44,2	12,6	150,0
Гомель, 2021	15,8	< п. о.	85,1	56,9	19,2	177,2
Добруш, 2009	87,2	58,9	109,0	48,8	6,4	237,5
Ельск, 2012	14,0	2,8	41,7	56,7	25,1	126,6
Жлобин, 2019	9,9	< п. о.	45,7	59,3	22,1	165,7
Калинковичи, 2017	9,0	< п. о.	20,4	57,6	26,9	71,1
Мозырь, 2018	3,9	< п. о.	20,4	85,3	34,6	173,9
Речица, 2020	4,8	< п. о.	19,1	45,0	10,6	76,4
Рогачев, 2020	19,8	3,5	55,0	34,1	4,9	62,4
Светлогорск, 2022	25,5	5,1	89,1	74,3	35,5	115,8
Чечерск, 2009	46,8	11,1	107,9	78,1	49,0	109,0
Фоновое значение	10,7			65,9		
ПДК	130,0			160,0		
Пороговое значение	136,0			214,0		

Примечания. Жирным шрифтом – значение выше гигиенического норматива; < п. о. – ниже предела обнаружения метода определения.

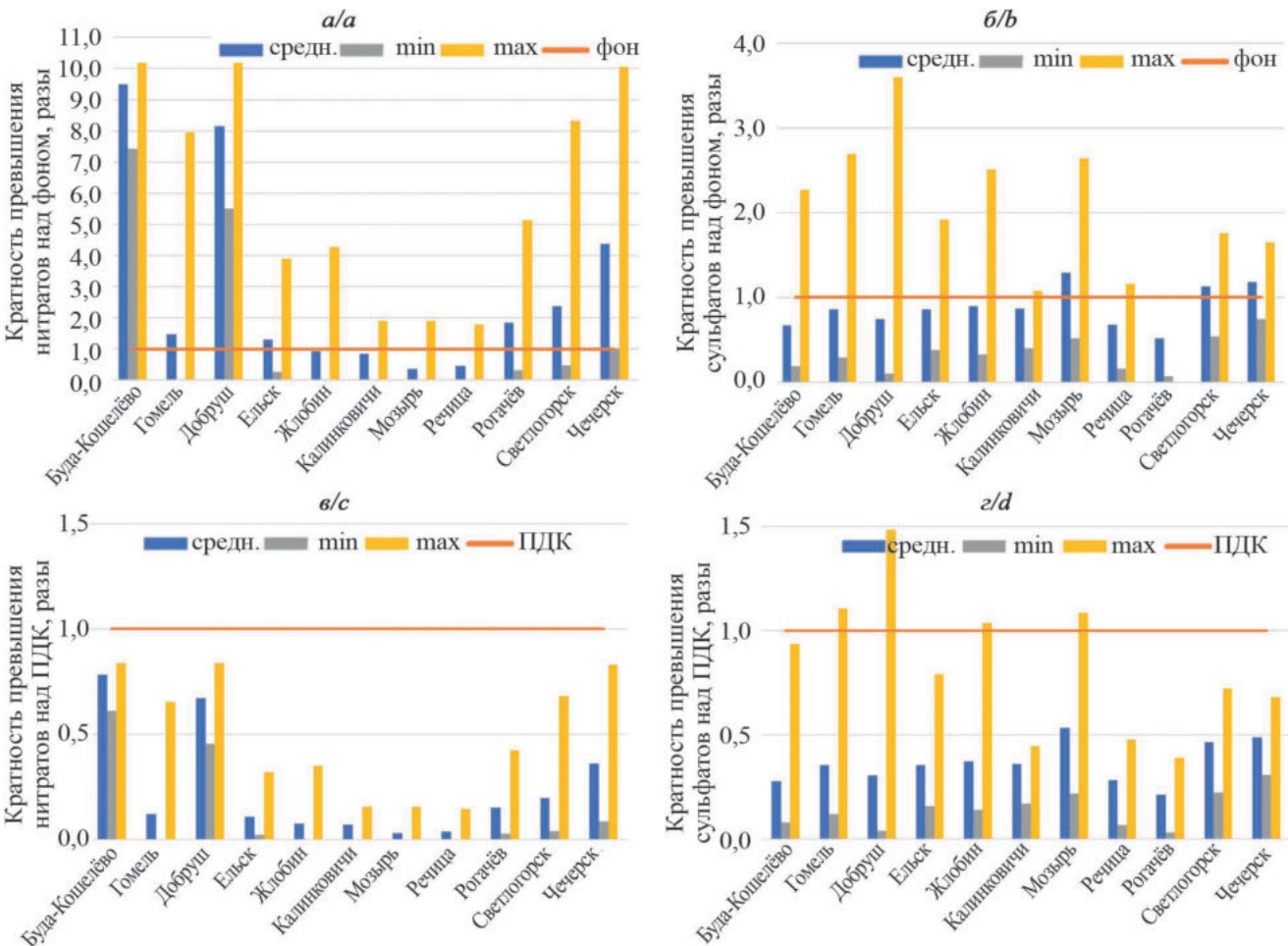


Рис. 3. Кратность превышения содержания нитратов и сульфатов в почвах городов Гомельской обл.:
а и б – над фоновым значением, в и г – над ПДК

Fig. 3. Multiplicity of excess of the content of nitrates and sulfates in the soils of the cities of the Gomel region:
a and б – above the background value, в and г – above the MPC

Минимальные отмеченные на территории городов Гомельской обл. значения нитратов ниже предела обнаружения метода или кратны фону с Кс от 0,3 до 7,4. Максимальная концентрация варьировала от Кс = 1,7 в г. Речица до Кс = 10,2 в г. Буда-Кошелево и г. Добруше.

Среднее содержание сульфатов в почвах городов Гомельской обл. не превысило фон с Кс = 0,7 в г. Буда-Кошелево до Кс = 1,3 в г. Мозыре.

Наименьшие зафиксированные в почвах населенных пунктов концентрации сульфатов ниже фоновых значений от 1,3 до 13,4 раза. Максимальное содержание различалось по городам в 3,8 раз с Кс от 0,9 в г. Рогачеве до Кс = 3,6 в г. Добруше.

Превышения гигиенического норматива зафиксированы на отдельных участках четырех городов от 1,1 до 1,5 ПДК (см. рис. 3). В г. Добруше на одном из участков городской территории выявлено превышение порогового значения с низкой степенью загрязнения почвы.

В почвах городов *Гродненской обл.* среднее содержание нитратов составило по коэффициенту концентрации от 0,4 в г. Новогрудке до 10,9 – в г. Сморгони. Превышение средних значений над фоном наблюдалось в половине обследованных городов (табл. 7, рис. 4).

Таблица 7

Содержание нитратов и сульфатов в почвах городов Гродненской обл.

Table 7

Content of nitrates and sulfates in soils of cities of the Grodno region

Город, год	Содержание химических веществ, мг/кг					
	среднее	минимальное	максимальное	среднее	минимальное	максимальное
	NO ₃			SO ₄		
Березовка, 2018	1,9	< п. о.	5,5	40,1	28,3	65,8
Волковыск, 2019	11,0	< п. о.	44,7	59,1	27,4	126,8
Гродно, 2022	18,5	3,9	77,6	103,7	31,2	169,6
Красносельский, 2019	7,4	< п. о.	18,2	37,4	16,3	60,5
Лида, 2022	6,5	< п. о.	22,4	85,8	44,7	186,8
Новогрудок, 2019	4,0	< п. о.	8,1	59,4	22,1	137,9
Слоним, 2021	12,4	3,1	20,4	71,0	44,2	143,6
Сморгонь, 2011	107,9	52,6	203,6	48,9	34,7	70,8
Фоновое значение	9,9			54,4		
ПДК	130,0			160,0		
Пороговое значение	136,0			214,0		

Примечания. Жирным шрифтом – значение выше гигиенического норматива; < п. о. – ниже предела обнаружения метода определения.

Максимальные зафиксированные значения нитратов в городских почвах имели существенные различия: от Кс = 0,6 в г. Березовке до Кс = 20,6 – в г. Сморгони. Загрязнение почв нитратами с превышением ПДК в 1,6 раза и порогового значения с низкой степенью загрязнения отмечено на отдельном участке в г. Сморгони, что не характерно для других городов Беларуси (рис. 4).

Среднее содержание сульфатов в почвах по городам отличалось незначительно. Наименьшее среднее для города значение отмечено в п. Красносельском с Кс = 0,7, наибольшее – в г. Гродно с Кс = 1,9.

Максимальные концентрации варьировали от Кс = 1,1 в почвах на территории Березовки до Кс = 3,4 в г. Лиде. Превышения максимальных концентраций над ПДК отмечены в двух городах – г. Гродно и г. Лида (рис. 4).

В почвах на территории городов *Минской обл.* наименьшая средняя концентрация нитратов зафиксирована в г. Солигорске с Кс = 0,3, наибольшая – в г. Воложине с Кс = 4,9 (табл. 8, рис. 5).

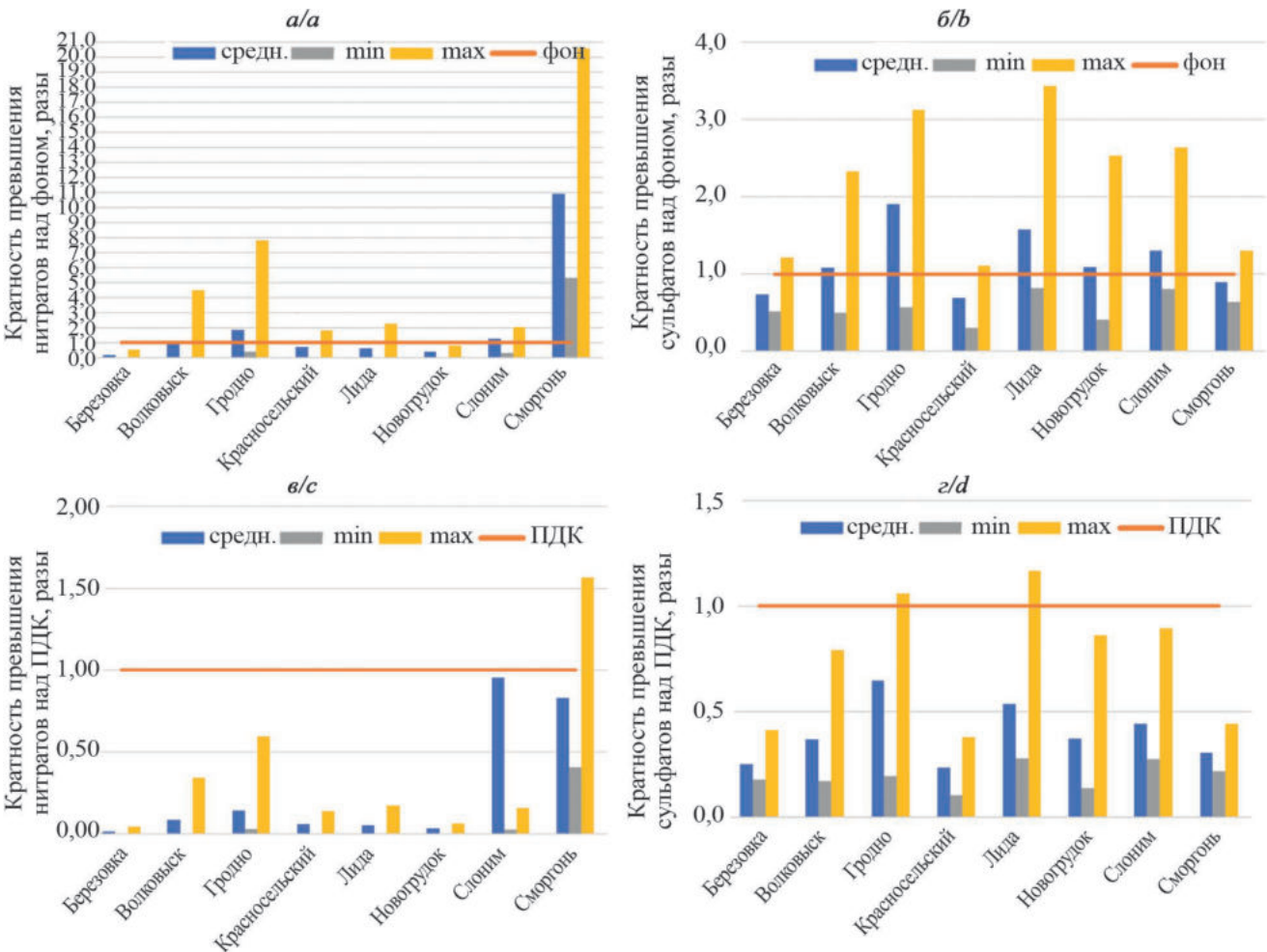


Рис. 4. Кратность превышения содержания нитратов и сульфатов в почвах городов Гродненской обл.:
а и б – над фоновым значением, в и г – над ПДК

Fig. 4. Multiplicity of excess of the content of nitrates and sulfates in the soils of the cities of the Grodno region:
a and b – above the background value, c and d – above the MPC

Таблица 8

Содержание нитратов и сульфатов в почвах городов Минской обл.

Table 8

Content of nitrates and sulfates in soils of cities of the Minsk region

Город, год	Содержание химических веществ, мг/кг					
	среднее	минимальное	максимальное	среднее	минимальное	максимальное
	NO ₃			SO ₄		
Минск, 2019	18,0	< п. о.	64,6	80,5	27,4	159,0
Борисов, 2022	22,9	3,5	89,1	69,9	11,8	127,3
Воложин, 2010	53,8	19,1	109,0	59,8	28,5	92,8
Жодино, 2020	4,5	< п. о.	15,1	84,6	37,0	150,8
Молодечно, 2021	29,8	5,2	83,2	78,5	37,5	156,1
Слуцк, 2020	18,5	5,9	52,5	48,4	22,0	172,9
Солигорск, 2018	3,7	< п. о.	9,1	65,0	28,3	122,5
Фоновое значение	11,0			55,2		
ПДК	130,0			160,0		
Пороговое значение	136,0			214,0		

Примечания. Жирным шрифтом – значение выше гигиенического норматива; < П. О. – ниже предела обнаружения метода определения.

Минимальные значения нитратов в почвах большинства исследованных городов ниже предела обнаружения метода или ниже фона для почв Минской обл., в г. Воложине $K_c = 1,7$. Различия в максимальных для городов значениях составили 11,9 раза, коэффициенты концентраций варьировали от $K_c = 0,8$ в почвах г. Солигорска до $K_c = 9,9$ – г. Воложина. Накопления нитратов выше нормативов не зафиксировано (рис. 5).

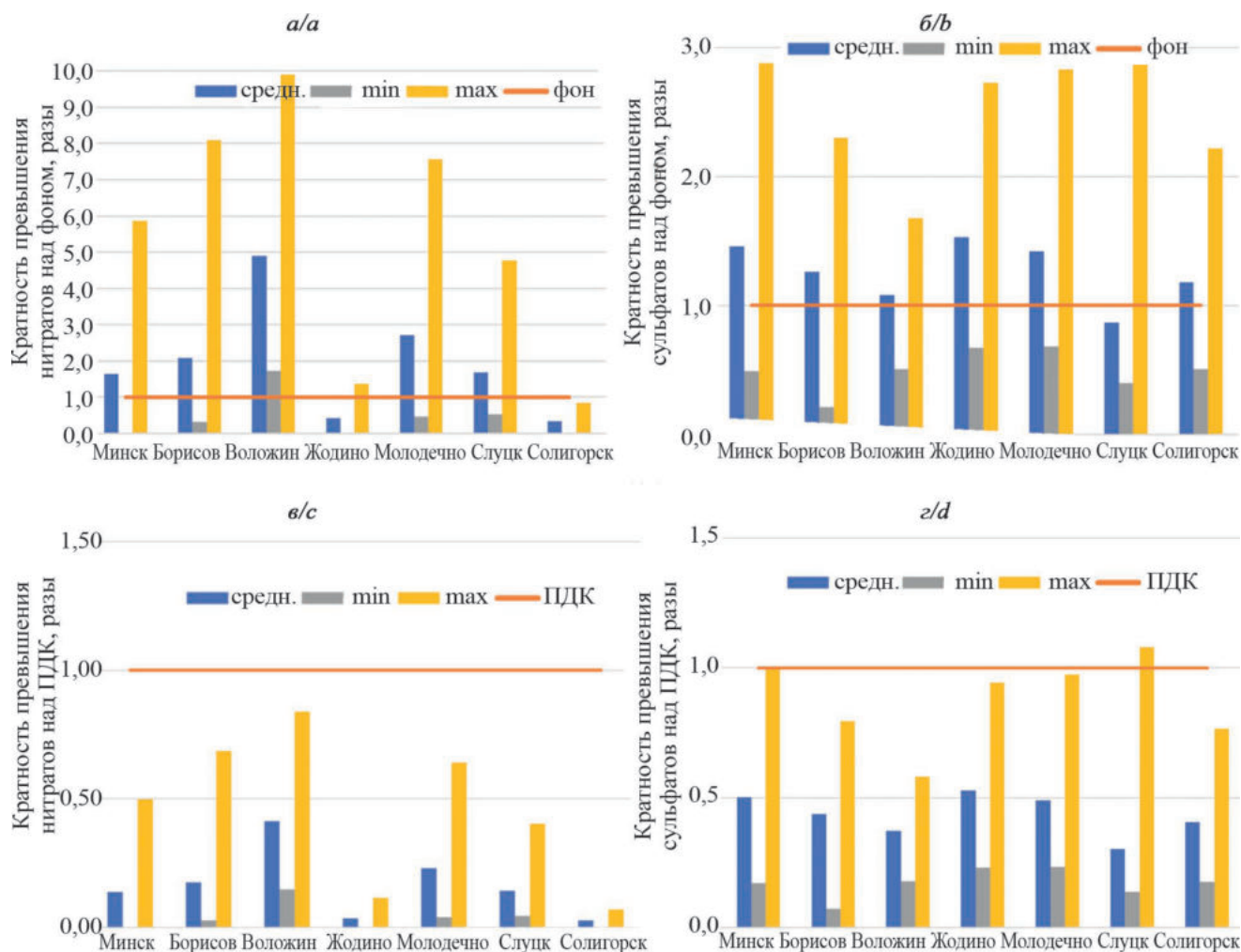


Рис. 5. Кратность превышения содержания нитратов и сульфатов в почвах городов Минской обл.: а и б – над фоновым значением, в и г – над ПДК

Fig. 5. Multiplicity of excess of the content of nitrates and sulfates in the soils of the cities of the Minsk region: a and b – above the background value, c and d – above the MPC

Среди средних показателей содержания сульфатов в почвах городов Минской области наименьший зафиксирован в г. Слуцке ($K_c = 0,9$), наибольший – в г. Жодино ($K_c = 1,5$) (см. рис. 5).

Наименьшие концентрации сульфатов в почвах обследованных населенных пунктов не превысили фоновое значение. Максимальные зафиксированные значения варьировали незначительно с $K_c = 1,7$ в почвах г. Воложина до $K_c = 3,1$ – г. Слуцка. При этом в почвах г. Слуцка максимальное содержание превысило ПДК в 1,1 раза.

В почвах городов **Могилевской обл.** разброс значений среднего содержания нитратов составил десятки раз, с $K_c = 0,2$ в почвах г. Костюковичей до $K_c = 9,8$ – г. Быхова. Накопление нитратов выше фона, установленного для почв Могилевской обл., отмечено в четырех обследованных городах (табл. 9, рис. 6).

Минимальные значения нитратов в почвах большинства исследованных городов ниже предела обнаружения метода. Исключениями явились города Быхов, Осиповичи и Чериков, где K_c составили от 0,5 до 5,1.

Превышение максимальных значений над фоном зафиксировано в большинстве обследованных населенных пунктов Могилевской обл. с K_c от 1,4 в г. Горках до 15,6 – в г. Быхове.

Коэффициенты концентрации сульфатов, рассчитанные для средних по городам значениям, составили от $K_c = 0,1$ в г. Быхове до $K_c = 2,2$ в г. Костюковичи и в большинстве городов превысили региональный фон.

Таблица 9

Содержание нитратов и сульфатов в почвах городов Могилевской обл.

Table 9

Content of nitrates and sulfates in soils of cities of the Mogilev region

Город, год	Содержание химических веществ, мг/кг					
	среднее	минимальное	максимальное	среднее	минимальное	максимальное
	NO ₃			SO ₄		
Бобруйск, 2019	3,2	< п. о.	20,0	52,7	13,4	269,1
Быхов, 2009	61,0	31,4	97,0	3,1	<п.о	52,5
Горки, 2011	2,8	< п. о.	8,5	74,9	36,9	103,2
Костюковичи, 2017	1,0	< п. о.	6,9	114,0	13,4	295,9
Кричев, 2018	7,2	< п. о.	34,7	69,1	13,3	267,0
Могилев, 2020	3,4	< п. о.	15,5	63,9	11,1	173,9
Мстиславль, 2009	5,9	< п. о.	39,8	61	39,9	79,9
Осиповичи, 2010	37,5	20,9	74,1	50,7	15,7	125
Славгород, 2009	3,8	< п. о.	10	69,8	51,4	91,3
Чаусы, 2012	2,0	< п. о.	8,9	6,4	55,1	74,5
Чериков, 2012	6,7	3,2	12,9	70,9	48,7	93,7
Шклов, 2011	1,7	< п. о.	5,8	90,3	40,5	121,6
Фоновое значение	6,2			51,5		
ПДК	130,0			160,0		
Пороговое значение	136,0			214,0		

Примечания. Жирным шрифтом – значение выше гигиенического норматива; < п. о. – ниже предела обнаружения метода определения.

Наименьшие зафиксированных значения сульфатов в большинстве городов ниже или в пределах фоновое уровня. Максимальные концентрации составили от $K_c = 1,0$ до $K_c = 5,7$. Превышение ПДК отмечено в четырех городах от 1,1 ПДК до 1,8 ПДК. В г. Бобруйске, г. Костюковичах и г. Кричеве также зафиксировано превышение пороговых значений для сульфатов, свидетельствующее о низкой степени загрязнения почв на отдельных участках городских территорий.

Временная динамика и прогноз изменения концентрации нитратов и сульфатов в почвах исследованных городов. Для оценки динамики накопления/рассеивания сульфатов и нитратов на территории городов Беларуси использовались значения их среднего содержания в городских почвах по турам обследований. Для анализа выбрано 30 городов, для которых проводилось четыре и более туров обследования за период с 2000 по 2022 гг.

После статистической обработки фактических данных в программе *Microsoft Office Excel* все анализируемые города условно были разделены на несколько групп по методике, предложенной в [10]. К *первой группе* отнесены города, в почвах которых различия в содержании химического вещества между первым и последним турами обследования составили менее 1,2 раза и можно считать, что динамика отсутствует. К *второй группе* отнесены города, в почвах которых различия в содержании химического вещества по турам обследования составили от 1,2 до 1,5 раза (такое увеличение или уменьшение содержания химического вещества считалось незначительным). *Третья группа* – это города со значительным снижением / увеличением за исследованный период содержания химических веществ, при котором средние по городу концентрации различались по турам обследования более чем в 1,5 раза.

Оценка динамики концентрации **нитратов** в почвах исследованных городов показала, что в 90 % населенных пунктов, расположенных во всех административных областях Беларуси, наблюдалось снижение за анализируемый период концентрации нитратов в почвенном покрове, что свидетельствует об устойчивой тенденции сокращения их образования / поступления в почвы урбанизированных территорий. При этом в ряде городов наблюдалось относительно планомерное уменьшение содержания данного химического вещества в почвах по турам обследования, в других населенных пунктах количественные характеристики нитратов в отдельных турах обследования существенно различались с общей тенденцией к понижению концентраций к последнему туру обследования (рис. 7).

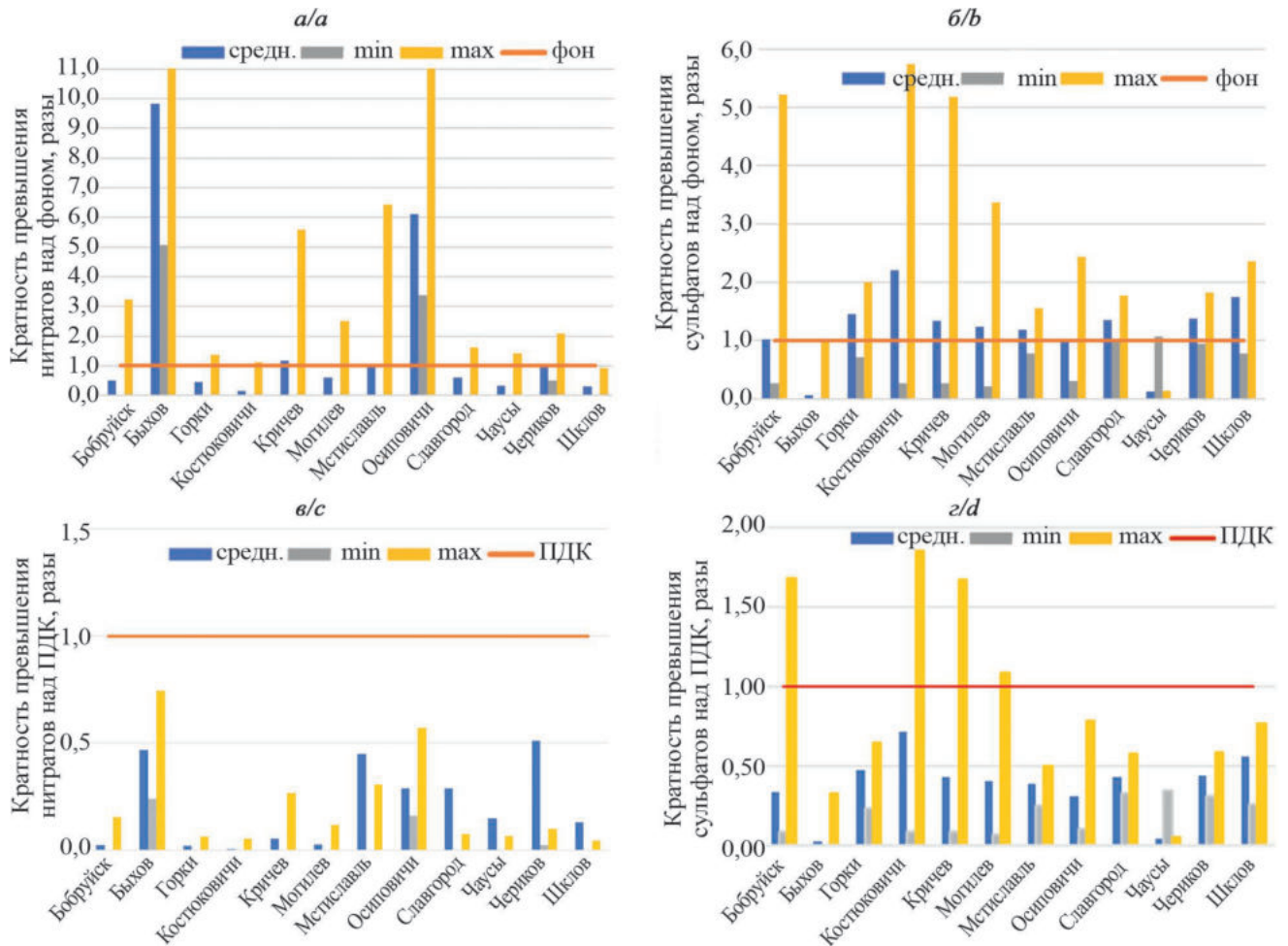


Рис. 6. Кратность превышения содержания нитратов и сульфатов в почвах городов Могилевской обл.:
а и б – над фоновым значением, в и г – над ПДК

Fig. 6. Multiplicity of excess of the content of nitrates and sulfates in the soils of the cities of the Mogilev region:
a and b – above the background value, c and d – above the MPC

В некоторых населенных пунктах, расположенных в Витебской и Минской областях, существенных изменений в концентрации нитратов в почвах за период наблюдений не зафиксировано.

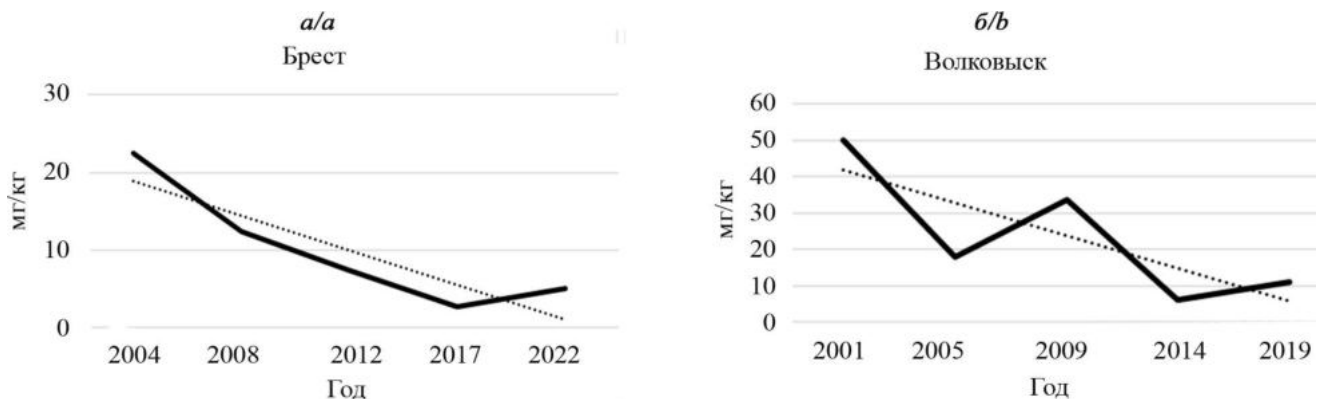


Рис. 7. Различия в характере накопления нитратов в почвах отдельных городов Беларуси по турам обследования:
а) Брест; б) Волковыск

Fig. 7. Differences in the nature of nitrate accumulation in the soils of individual cities of Belarus according to survey rounds:
a) Brest; b) Volkovysk

Оценка изменений, произошедших за более чем двадцатилетний период в концентрации **сульфатов** в почвенном покрове, выявила тенденцию к их накоплению в большинстве населенных пунктов всех административных областей Беларуси. В 59 % случаев почвы характеризовались значительным увеличением содержания сульфатов, в 1,5 раза превысившем значения, зафиксированные в начальный период измерений, в 41 % случаев накопление серосодержащего соединения в почвах незначительное.

Несмотря на общую тенденцию к увеличению содержания сульфатов в городских почвах, по турам обследования их концентрации на территории отдельных городов существенно отличались. В ряде населенных пунктов увеличение содержания сульфатов характеризовалось равномерностью, в других городах в отдельные туры обследования различия в их концентрациях в почвах были существенны (рис. 8).

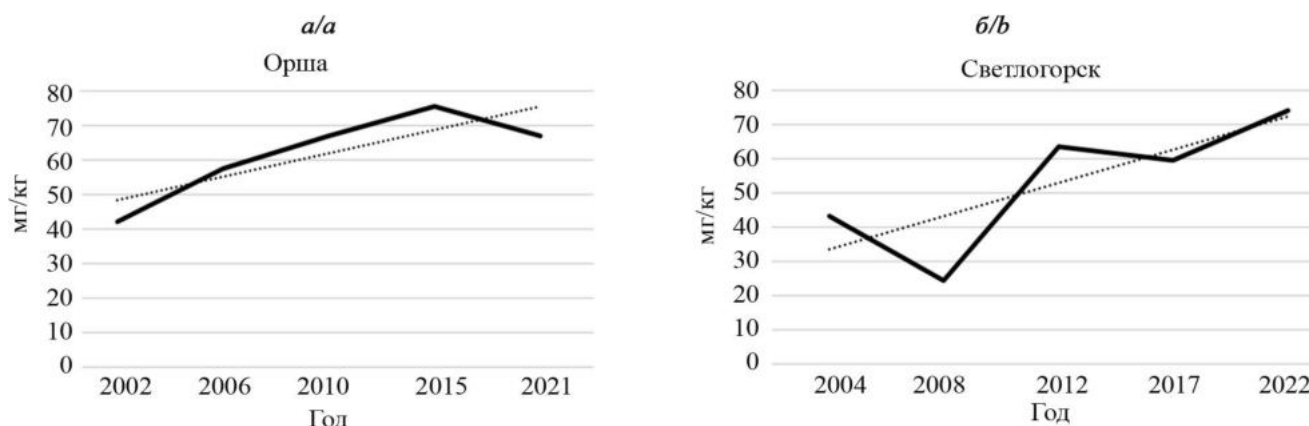


Рис. 8. Различия в характере накопления сульфатов в почвах отдельных городов Беларуси по турам обследования:
а) Орша; б) Светлогорск

Fig. 8. Differences in the nature of sulfate accumulation in the soils of individual cities of Belarus according to survey rounds:
a) Orsha; b) Svetlogorsk

В почвах г. Слуцка, относящегося к городам Минской обл., наблюдалась тенденция значительного снижения концентрации в них сульфатов, что не характерно для большинства городских земель. Единичный случай отсутствия выраженной динамики в содержании сульфатов отмечен в почвах г. Полоцка, однако по турам обследования наблюдались разнонаправленные тенденции в их накоплении.

В г. Минске за 2000–2022 гг. проведено 10 этапов обследования, которые выявили разнонаправленные тенденции в содержании нитратов в почвах по годам со значительным разбросом значений с общей тенденцией к понижению их концентраций в почвенном покрове города от первого к последнему этапу наблюдений. Для сульфатов отмечалась общая тенденция к их накоплению в почвах с незначительным снижением концентраций в 2013 и 2015 гг.

Итак, можно прогнозировать долгосрочную позитивную тенденцию в улучшении экологического состояния почв за счет снижения или стабилизации накопления нитратов во всех исследованных населенных пунктах, сульфатов – в двух населенных пунктах.

Негативная тенденция увеличения содержания химических веществ в городских почвах проявилась для сульфатов в 94 % населенных пунктов, что требует принятия мер по минимизации техногенных поступлений серосодержащих соединений в почвенный покров городских территорий.

Заключение

Оценка современного состояния почв городских территорий выявила пространственные различия в накоплении нитратов и сульфатов по административным областям страны. Наименьшие концентрации нитратов отмечены в городах Брестской обл. ($K_c = 0,5$), наибольшие – в Гомельской ($K_c = 2,8$). Для сульфатов наблюдалась обратная тенденция: наименьшее среднее содержание зафиксировано в Гомельской обл. ($K_c = 1,0$), наибольшее – в Брестской ($K_c = 1,5$). При этом различия в накоплении сульфатов по областям незначительные, в то время как для нитратов разброс средних значений составил более 5 раз.

В одном из городов Гродненской обл. (г. Сморгонь) зафиксировано локальное загрязнение почв нитратами до 1,6 ПДК и превышение порогового значения с низкой степенью загрязнения, что не характерно для городских почв, в которых содержание нитратов незначительное и имеет тенденцию к снижению.

Максимальные значения сульфатов, отмеченные на отдельных участках городов, составили от >1,0 до 3,0 ПДК, в шести случаях фиксировалось превышение порогового значения в пределах, определяющих низкую степень загрязнения почв.

Оценка концентрации нитратов в городских почвах показала, что в 90 % населенных пунктов отмечена тенденция значительного сокращения их содержания в почвы урбанизированных территорий. Можно предположить, что такое уменьшение азотсодержащих веществ обусловлено снижением количества органического вещества в почвах и замедлением процессов нитрификации при его разложении, а также незначительной долей азотфиксирующих организмов, присутствующих в городских почвах.

Оценка изменений, произошедших за более чем двадцатилетний период в концентрации сульфатов в почвенном покрове, выявила в большинстве городов тенденцию к их накоплению, что предполагает техногенный характер поступления в почвы. При этом в 59 % случаев почвы характеризовались значительным увеличением содержания сульфатов, в 41 % случаев накопление серосодержащего соединения в почвах незначительное.

В почвах г. Минска за 2000–2022 гг. установлены разнонаправленные тенденции в содержании нитратов по годам с общей тенденцией к значительному понижению их концентрации. Для сульфатов отмечалась некоторое накопление в почвах с незначительным снижением концентраций в 2013 и 2015 гг.

Следовательно, можно прогнозировать ухудшение экологического состояния почв в 94 % исследованных населенных пунктов за счет увеличения в них концентрации сульфатов и положительную тенденцию, выраженную в снижении или стабилизации накопления нитратов в почвенном покрове городских территорий.

Библиографические ссылки

1. Хомич ВС, Какарека СВ, Кухарчик ТИ. *Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси*. Минск: Минсктиппроект; 2004. 259 с.
2. Курбатова АС, Башкин ВН, Касимов НС. *Экология города*. Москва: Научный мир; 2004. 624 с.
3. Хомич ВС, Какарека СВ, Кухарчик ТИ и др. *Городская среда: геоэкологические аспекты: монография*. Минск: Беларуская навука; 2013. 301 с.
4. Оношко МП. *Азот и его минеральные формы в ландшафтах Беларуси*. Минск: Наука и техника; 1990. 174 с.
5. Ереско МА, Клебанович НВ. О необходимости совершенствования нормативов предельно допустимых концентраций минеральных форм азота в почвах. *Природные ресурсы*. 2019;1:14–23.
6. Семененко НН, Невмержицкий НВ. *Азот в земледелии Беларуси*. Минск: Белорусское издательское товарищество «Хата»; 1997. 193 с.
7. Маслова ИЯ. Воздействие содержащих серу аэротехногенных веществ на некоторые агрохимически значимые процессы и свойства почвы. *Агрохимия*. 2008;6:80–94.
8. Орлов ДС, Садовникова ЛК, Суханова НИ. *Химия почв*. Москва: Высшая школа; 2005. 558 с.
9. Саэт ЮЕ, Ревич БА, Янин ЕП, и др. *Геохимия окружающей среды*. Москва: Недра; 1990. 335 с.
10. Хомич ВС, редактор. *Прогноз состояния природной среды Беларуси на период до 2035 года*. Минск: Беларуская навука; 2023. 120 с.

References

1. Khomich VS, Kakareka SV, Kukharchik TI. *Ekogeokhimiya gorodskikh landshaftov Belarusi* [Ecogeochimistry of urban landscapes of Belarus]. Minsk: Minsktippiroekt; 2004. 259 p. Russian.
2. Kurbatova AS, Bashkin VN, Kasimov NS. *Ekologiya goroda* [Ecology of the city]. Moscow: Nauchnyi mir; 2004. 624 p. Russian.
3. Khomich VS, Kakareka SV, Kukharchik TI, et al. *Gorodskaya sreda: geoekologicheskie aspekty. Monografiya* [Urban environment: geoeological aspects. Monograph]. Minsk: Belarusskaya navuka; 2013. 301 p. Russian.
4. Onoshko MP. *Azot i ego mineral'nye formy v landshaftakh Belarusi* [Nitrogen and its mineral forms in the landscapes of Belarus]. Minsk: Nauka i Technika; 1990. 174 p. Russian.
5. Yeresko MA, Klebanovich NV. *O neobkhodimosti sovershenstvovaniya normativov predel'no dopustimyykh kontsentratsii mineral'nykh form azota v pochvakh* [On the need to improve the standards of maximum permissible concentrations of mineral forms of nitrogen in soils]. *Natural Resources*. 2019;1:14–23. Russian.
6. Semenenko NN, Nevmerzhiitsky NV. *Azot v zemledelii Belarusi* [Nitrogen in agriculture of Belarus]. Minsk: Belorusskoye izdatel'skoye tovarishchestvo «Khata»; 1997. 193 p. Russian.
7. Maslova IYa. *Vozdeystvie soderzhashchikh seru aerotekhnogennykh veshchestv na nekotorye agrokhimicheski znachimye protsessy i svoystva pochvy* [The effect of sulfur-containing aerotechnogenic substances on some agrochemically significant processes and soil properties]. *Agrochemistry*. 2008;6:80–94. Russian.
8. Orlov DS, Sadovnikova LK, Sukhanova NI. *Khimiya pochv* [Chemistry of soils]. Moscow: Vysshaya shkola; 2005. 558 p. Russian.
9. Saet YuE, Revich BA, Yanin EP, et al. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow: Nedra; 1990. 335 p. Russian.
10. *Prognoz sostoyaniya prirodnoi sredy Belarusi na period do 2035 goda* [Forecast of the state of the natural environment of Belarus for the period until 2035]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2022. 120 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 21.10.2024.
Received by editorial board 21.10.2024.

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Калиниченко С. А., Марченко Ю. Д., Белаи В. Е.</i> Тенденции изменения климата в белорусском секторе ближней зоны Чернобыльской АЭС.....	4
<i>Голубев А. П., Улащик Е. А., Бодиловская О. А.</i> Моделирование роста инвазивного вида речных раков <i>Procambarus virginalis</i> (Decapoda, Astacidea) в различных температурных условиях	18

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Шабалева М. А., Деменковец Н. Н., Ненашев Р. А.</i> Оценка динамики индивидуальных доз внутреннего облучения ПГРЭЗ работников Полесского радиационно-экологического заповедника	35
<i>Кудин М. В., Евсеев Е. Б., Гарбарук Д. К., Воронецкая А. Н., Драгун А. В.</i> Параметры перехода радионуклидов в биомассу мискантуса гигантского на землях зоны отчуждения Полесского государственного радиационно-экологического заповедника	44
<i>Емельяненко Е. В., Штуро И. А., Петкевич М. Н.</i> Неопределенности вычисления геометрических параметров очагов накопления радиофармацевтического препарата на диагностических изображениях при проведении предлучевой подготовки к радиохирургии.....	55
<i>Журавков В. В., Тонконогов Б. А., Герменчук М. Г., Цыбулько Н. Н.</i> Web-ориентированная информационно-аналитическая система для совершенствования мероприятий по радиационной защите населения и объектов окружающей среды на различных региональных уровнях	61

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Пухтеева И. В., Герасимович Н. В., Гиль М. Д.</i> Комбинированное действие дексаметазона и перекиси водорода на структурное состояние плазматических мембран тимоцитов экспериментальных животных	74
<i>Величко А. В., Нижегородова Д. Б., Назаренко Е. М., Музыченко Б. А., Зафранская М. М.</i> Микроокружение опухоли: систематический обзор	85

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Головатый С. Е., Савченко С. В., Самусик Е. А., Сеницкая М. Л.</i> Пространственно-временные особенности содержания сульфатов и нитратов в почвах урбанизированных территорий	99
--	----

CONTENTS

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Kalinichenko S. A., Marchenko Yu. D., Belash V. E.</i> Climate change trends in the belarusian sector of exclusion zone of the Chernobyl NPP.....	4
<i>Golubev A. P., Ulashchyk E. A., Bodilovskaya O. A.</i> Modeling the growth of the invasive river crayfish species <i>Procambarus virginalis</i> (Decapoda, Astacidea) under different temperature conditions	18

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Shabaleva M. A., Demenkovec N. N., Nenashev R. A.</i> Assessment of the dynamics of individualized internal exposure dose irradiation of PSRER workers of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve	35
<i>Kudin M. V., Evseev E. B., Garbaruk D. K., Voronetskaya A. N., Dragun A. V.</i> Parameters of the transition of radionuclides into the biomass of <i>miscanthus giganteus</i> on the lands of the exclusion zone of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve	44
<i>Emelianenko E. V., Shturo I. A., Piatkevich M. N.</i> Uncertainties in calculating the geometric parameters of radiopharmaceutical accumulation lesion on diagnostic images during pre-radiation preparation for radiosurgery	55
<i>Zhuravkov V. V., Tonkonogov B. A., Germenchuk M. G., Tsybulka M. M.</i> Web-oriented information and analytical system for improving complex of radiation protection of population and environmental objects at various regional levels	61

MEDICAL ECOLOGY

<i>Puhteeva I. V., Gerasimovich N. V., Gil M. D.</i> The combined effect of dexamethasone and hydrogen peroxide on the structural state of the plasma membranes of thymocytes of experimental animals.....	74
<i>Vialichka A. V., Nizheharodava D. B., Nazaranka E. M., Muzychenka B. A., Zafranskaya M. M.</i> Tumor microenvironment: systematic review	85

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Golovaty S. E., Savchenko S. V., Samusik E. A., Sinitskaya M. L.</i> Spatiotemporal peculiarities of sulfate and nitrate concentration in soils of urbanized areas	99
---	----

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

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

**Журнал Белорусского
государственного университета. Экология.
№ 4. 2024**

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 27.12.2024.
Тираж 100 экз. Заказ 574.

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

© БГУ, 2024

**Journal
of the Belarusian State University. Ecology.
No. 4. 2024**

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 27.12.2024.
Edition 100 copies. Order number 574.

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

© BSU, 2024