



БЕЛОРУССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ЖУРНАЛ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ЭКОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

ECOLOGY

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

4

2022

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

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

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

УДК 004.932.2+004.582

СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ В МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

С. В. ТКАЧЕНКО¹⁾, Т. В. СМЕРНОВА¹⁾

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

Представлены результаты проектирования системы компьютерного зрения с использованием глубокого обучения для управления подконтрольными системами. Результаты исследования основаны на использовании сверточной нейронной сети и направлены на решение задач как напрямую, так и косвенно связанных с проблемами в области экологии. Описан принцип и показана базовая модель использования технологии компьютерного зрения в актуальных проектах: 1) соблюдение нормы социального дистанцирования в условиях пандемии COVID; 2) бесконтактный манипулятор для управления техническими объектами. Проект «Социальное дистанцирование в условиях пандемии COVID-19» разработан как средство автоматического контроля за дистанцией в местах массового скопления людей. Изучается принцип работы детектора, основанный на технологии компьютерного зрения, что позволяет контролировать соблюдение нормы физического дистанцирования. Для работы детектора требуется компьютер с необходимым

Образец цитирования:

Ткаченко СВ, Смирнова ТВ. Система компьютерного зрения в мобильных устройствах. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;4:4–14.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-4-14>

For citation:

Tkachenko SV, Smirnova TV. Computer vision system in mobile devices. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;4:4–14. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-4-14>

Авторы:

Сергей Витальевич Ткаченко – аспирант кафедры информационных технологий в экологии и медицине.
Татьяна Васильевна Смирнова – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры информационных технологий в экологии и медицине.

Authors:

Sergei V. Tkachenko, postgraduate student at the department of information technologies in ecology and medicine.
freddy.clarck@yandex.ru
Tatsiana V. Smirnova, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of information technologies in ecology and medicine.
smirnova@iseu.by

программным обеспечением и результаты изображений с видеокamеры. Работа детектора проверена в реальных условиях: результаты контроля удовлетворительные. Погрешность при определении расстояния не превышала 9 %. Предполагается, что такое устройство может использоваться различными службами, включая санитарные, для контроля соблюдения населением рекомендаций системы здравоохранения относительно правил дистанцирования. Проект «Бесконтактный манипулятор» был разработан для дистанционного управления объектами при работе в труднодоступных и опасных для здоровья человека местах (атомные станции, переработка токсичных отходов), а также людям с ограниченными физическими возможностями. В его работе реализованы три функции – трекинг ключевых точек руки, перехват действий манипулятора компьютерной мыши, управление дополнительными функциями компьютера. Работа манипулятора также проверена в реальных условиях, степень достоверности результатов высокая. В перспективе манипулятор предполагается использовать в мобильном аппаратно-программном комплексе, предназначенном для обработки изображений с последующим анализом данных. Области практического применения комплекса – экологический мониторинг, исследование процессов эрозии почв, наблюдение за изменениями растительного покрова, анализ заболеваемости растений, сортировка отходов, экология человека. Ресурсы современных информационных технологий, реализованные через представленные проекты, демонстрируют возможность замены производства части материальных приборов их виртуальными аналогами, безопасными с точки зрения экологии.

Ключевые слова: компьютерное зрение; искусственная нейронная сеть; сверточная нейронная сеть; анализ изображений; L1-регуляризация; детектор объектов YOLO; NVIDIA CUDA; ключевые точки руки; фреймворк MEDIAPIPE; дополненная реальность.

COMPUTER VISION SYSTEM IN MOBILE DEVICES

S. V. TKACHENKO^a, T. V. SMIRNOVA^a

^a*International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daihabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: S. V. Tkachenko (freddy.clarck@yandex.ru)*

The article presents the results of designing a computer vision system using deep learning to control supervised systems. The results are based on the use of convolutional neural network and aimed at solving problems, both directly and indirectly related to the solution of environmental problems. The principle is described and the basic model of using computer vision technology in actual projects is shown: 1) social distancing norm compliance in COVID pandemic; 2) non-contact manipulator to control technical objects. The COVID-19 Social Distancing Project was developed as a means of automatic control of social distance in crowded places. The article describes the principle of operation of the detector, based on computer vision technology, and makes it possible to monitor compliance with the norm of physical distance. To work the detector requires a computer with the necessary software and the results of images from a video camera. The operation of the detector has been tested under real conditions; the test results are satisfactory. The error in determining the distance did not exceed 9 %. It is assumed that such a device can be used by various services, including sanitary services, to monitor the compliance of the population with the recommendations of the health care system regarding the rules of distancing. The «Contactless Manipulator» project was designed for remote control of objects when working in hard-to-reach and hazardous places (nuclear power plants, toxic waste processing), as well as for people with limited physical abilities. Three functions of “Noncontact manipulator” were implemented in the work – tracking of key points of hand, interception of computer mouse manipulator actions, and control of additional computer functions. The work of the manipulator was also tested in real conditions, the degree of reliability of the results is high. In the future, the manipulator is supposed to be used in a mobile hardware-software complex designed for image processing with subsequent data analysis. The expected fields of practical application of the complex are ecological monitoring, investigation of soil erosion processes, observation of vegetation changes, analysis of plant diseases, waste sorting, and human ecology. The resources of modern information technologies, implemented through the presented projects, demonstrate the possibility of replacing the production of some material devices with their virtual counterparts, safe in terms of ecology.

Keywords: computer vision; artificial neural network; convolutional neural network; image analysis; L1-regularization; YOLO object detector; NVIDIA CUDA; key hand points; MEDIAPIPE framework; augmented reality.

Введение

Компьютерное зрение и искусственные нейронные сети – наиболее востребованные направления современных научных и прикладных исследований. Программно-аппаратные комплексы с использованием технологии компьютерного зрения способны решать задачи распознавания объектов

на основе наборов данных (например, в экологии); усилить возможности диагностики и проведения лечения (в медицине); сократить время на обслуживание клиентов (в логистических центрах); многократно увеличить возможности систем контроля и безопасности. Создание в настоящее время автоматизированных систем и аппаратно-программных комплексов на базе систем компьютерного зрения – одна из приоритетных технических задач. Компьютерное зрение – область искусственного интеллекта, связанная с анализом изображений и видео. Она включает в себя набор методов, которые позволяют на основе заданных параметров автоматически фиксировать и обрабатывать изображения неподвижных и движущихся объектов с помощью программно-аппаратных средств [1].

Мощности современных вычислительных устройств, повышение разрешающей способности камер видеонаблюдения, развитие полосы пропускания каналов связи, а также внедрение технологий глубокого обучения – все это способствует тому, что компьютерное зрение стало находить все больше применений в различных сферах жизнедеятельности. Основной рост воплощения решений с использованием компьютерного зрения произошел относительно недавно, когда стали активно использоваться искусственные нейронные сети при анализе и обработке данных. В простых системах обработки информации, основанных на компьютерном зрении, обычно требуется получить количественную и качественную информацию из визуальных данных. В основном это такие параметры, как размер, цвет, количество, направление и характер движения объекта, а также контрастные переходы в окрестностях пикселя изображения, из которых можно выделить характерные особенности. На основе этих параметров производится анализ изображения для извлечения нужной информации.

Компьютерное зрение и глубокое обучение сегодня широко используются при решении задач как непосредственно, так и косвенно связанных с экологическими проблемами: анализ аэрофотоснимков местности; вырубка лесов, браконьерство, пожары; незаконное использование земель под сельскохозяйственные угодья; промышленное и гражданское строительство; загрязнение лесных массивов промышленными (включая радионуклиды) и бытовыми отходами.

Актуальность работы обусловлена тем, что востребованы «автономные» аппаратно-программные комплексы, включающие компонент компьютерного зрения, со следующими условиями: относительно невысокая стоимость, доступная элементная база, собственное программное обеспечение. Такие устройства могут быть использованы различными службами, включая экологические.

Цель работы: представить результаты применения технологии компьютерного зрения при реализации проектов по разработке детектора социального дистанцирования, востребованного в период эпидемий и сезонных заболеваний, и манипулятора, заменяющего прибор для управления объектом его виртуальным аналогом.

Действующие аналоги системы социального дистанцирования имеются в США, Китае и Сингапуре [2]. В США используется система распознавания объектов *YOLO* для идентификации людей без масок. В Китае стартапы *SenseTime*, *Megvii* и *DeepGlint* предложили похожие технологии, которые, помимо контроля дистанции, также измеряют температуру людей в толпе. Алгоритмы анализируют цвет белков глаз, кожи и общее положение тела для определения вероятности заражения COVID-19. В проекте *AI Hub* (Сингапур) разработано приложение *SafeDistancer*. Оно реализует функцию преобразования смартфона в устройство для определения расстояния и контроля социальной дистанции. Все указанные разработки проходят многоэтапное тестирование, однако реализованы лишь единичные экземпляры.

Материалы и методы исследования

Усовершенствование структуры искусственных нейронных сетей. При использовании искусственной нейронной сети (ИНС) решаются вопросы ее обучения или самоорганизации. Для обучения нейронной сети необходимо иметь большой объем входной информации, поскольку добиться высокой точности работы ИНС можно только на большом наборе данных. Например, первая представленная версия распознавания образов на основе ИНС содержала 38-процентный уровень ошибок классификации, а сейчас ошибка не превышает 3 %. Первые результаты распознавания голоса на основе ИНС содержали 27 % ошибок распознавания, а сегодня процент ошибок составляет не более 8 % [3]. Низкий процент ошибок объясняется тем, что в настоящее время в качестве обучающих выборок используется большой объем доступной информации с видео-хостинга и серия аудиоклипов с описаниями.

Представленные в статье проекты основаны на использовании сверточных нейронных сетей. Они являются одними из наиболее популярных в глубоком виде машинного обучения, при котором модель учится выполнять задачи классификации непосредственно на изображении, видео, тексте. Перед сверточными нейронными сетями ставятся такие задачи классификации, как идентификация объекта,

определение границ и семантическая сегментация, выделение объектов внимания на изображении, распознавание лиц и частей тела, выделение нормалей к поверхности для реконструкции плоских изображений в трехмерное представление. Задача обучения ИНС состоит в настройке весов w нейронов для нахождения состояния, минимизирующего целевую функцию на обучающей и тестирующей выборках. Поиск глобального минимума функции реализуется методом градиентного спуска по функции потерь $F(w)$. Обновление весов ИНС происходит на основе итерационной процедуры обратного распространения ошибки.

Наиболее часто нейронная сеть строится в виде связного графа, особенностью которого является прямое распространение информации, и обратное распространение сигнала об ошибке. Один из недостатков такой топологии – избыточность. Как следствие, аппаратно-программная реализация такого алгоритма сети требует больших вычислительных мощностей. Возможное решение проблемы состоит в том, чтобы из всего набора факторов отобрать лишь часть важнейших и убрать малозначимые веса, производя фактически сжатие сети (рис. 1).

Обнуление весов позволяет улучшить обобщающую способность сети. Кроме того, сеть с большим количеством нулей занимает меньше места и способна быстрее рассчитаться на более слабых архитектурах, например, одноплатных компьютерах [4].

Достичь разреженности позволяют L -регуляризации (набор методов), которые могут повысить точность модели, представленной ИНС, за счет подавления незначимых факторов.

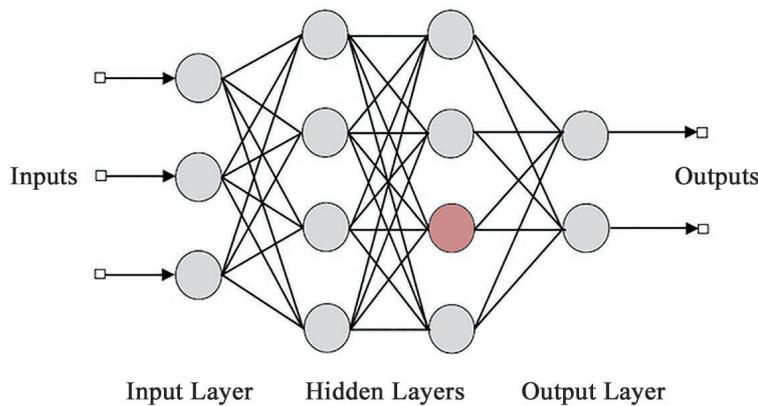


Рис. 1. Выявление «слабого» нейрона в искусственной нейронной сети

Fig. 1. Identifying the «weak» neuron in an artificial neural network

Существует три основных метода регуляризации: $L1$, $L2$ и *dropout* [5]. $L1$ - (*lasso*) и $L2$ -регуляризации, которые подавляют подгоночные коэффициенты и квадраты весов, соответственно. В *dropout*-регуляризации определенные нейроны исключаются из сети еще на этапе обучения. В результате приходим к более простой версии ИНС.

Однако эффект сжатия сети и ускорения предсказаний будет более значительным, если исключать из рассмотрения не отдельные веса, а нейроны из полносвязных слоев. Наиболее простой и эффективный способ изъятия лишних нейронов из сети состоит в использовании групповой *lasso*-регуляризации. Ее применяют, чтобы держать малозначимые веса в сетях нулевыми. Суть метода состоит в применении специального маскирующего слоя с собственным вектором весов $M = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$. Вес маски накладывает ограничения на веса слоев, связанных своими выводами с маской. Если среди этих весов половина полезных, то значение β_i близко к единице, и этот вывод сможет хорошо передавать информацию. Если β_i близко к нулю, то это обнулит вывод нейрона и, заодно, все веса, от которых зависит этот вывод. После отбрасывания каналов проводится доучивание сети.

К недостаткам $L1$ -регуляризации относится то, что отбрасывание каналов может внести изменения в топологию и исказить первоначальную структуру сети на этапе обучения. Для ее решения применяют периодическое исключение нейронов. Подбор параметров маскирующего слоя реализован в методе вариационной оптимизации ($L0$ -регуляризации).

На рис. 2 представлены результаты сравнения $L1$ и $L0$ алгоритмов редукции каналов после серии экспериментов с разными константами мощности регуляризации. ИНС содержит 4 сверточных и 2 полносвязных слоя; использовался набор данных *CIFAR-10* [6]. Сеть проходила обучение 200 эпох, после чего сохранялась, и к ней применялись алгоритмы редукции нейронов.

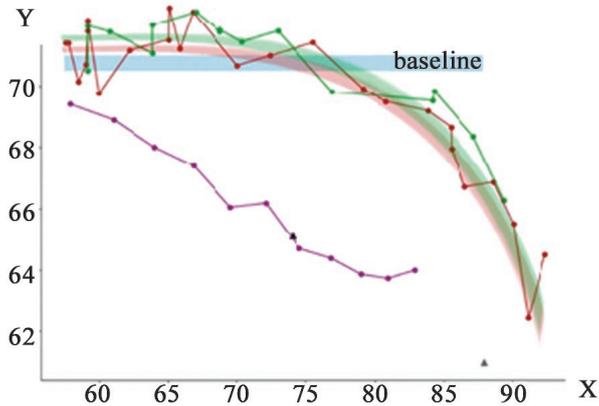


Рис. 2. Результат групповой регуляризации

Fig. 2. The result of group regularization

Здесь по оси X отложено уменьшение количества весов (в %) после применения соответствующего алгоритма редукции нейронов; по оси Y – точность сети с отброшенными нейронами на контрольной выборке. Синяя полоса – примерное качество сети, еще не подвергнутой редукции нейронов; зеленая линия – простой алгоритм L1-обучения; красная линия – L0-регуляризация; фиолетовая линия – удаление первых k каналов. Черные треугольники – обучение сети, у которой изначально было меньшее количество весов.

Вывод по обучению сети на доступном наборе данных следующий: многие каналы в обученной сети избыточны. Сокращение весов достигается с помощью регуляризации. На большом наборе данных классический L1-алгоритм показывает результаты обучения сети, сопоставимые с L0-регуляризацией.

Результаты исследования и их обсуждение

Применение технологии компьютерного зрения в детекторе социального дистанцирования.

Соблюдение социального дистанцирования важно для снижения вероятности контакта между больными и здоровыми людьми. Автоматизированный контроль за соблюдением нормы социального дистанцирования особенно актуален в период инфекционной активности. Наличие достаточного количества средств контроля за соблюдением рекомендуемой нормы в 1,5–2 м позволяет дисциплинировать население и сдерживать распространение опасных инфекций.

Аппаратная составляющая детектора дистанцирования. Обнаружение объектов – технология, которая относится к области компьютерного зрения. Задача состоит в распознавании определенных объектов на статичном оцифрованном изображении или в видеопотоке. При этом каждый объект обладает набором характерных особенностей, с помощью которых его можно классифицировать. Методы обнаружения объектов основаны на глубоком обучении и использовании искусственных нейронных сетей. Существующие системы по выявлению необходимых объектов в режиме реального времени требуют или специального оборудования, включая мощные компоненты для обработки логических и графических операций, или наличия высокоскоростного Интернета для обработки цифровых данных на серверах. В качестве необходимого элемента системы используются и оптические компоненты – камеры видеонаблюдения.

Обработка дискретных цифровых изображений требует переопределить геометрические параметры объектов – расстояние, угол наклона, координатные преобразования. Главной проблемой при создании аппаратной части детектора по соблюдению дистанции является определения точного расстояния между контролируемыми объектами, в данном случае – дистанции между людьми. Точнее, нужно определить, соблюдается ли расстояние между объектами более чем в N пикселей (точек на прямоугольной сетке). Следовательно, для использования данных оптических приборов в системе необходимо выяснить, какое количество пикселей (двумерных наборов входных данных) будет оптимальным. Для этого предлагается использовать метод подобия.

Пусть есть маркер или объект с известной шириной W. Он помещается на некотором расстоянии D от камеры. До данным из камеры оцениваем ширину P в пикселях, что позволяет нам рассчитать фокусное расстояние F [7]:

$$F = (P \cdot D) / W. \tag{1}$$

Перемещая камеру к объекту/маркеру и применяя свойство подобия треугольников, можно определить расстояние от объекта до камеры по формуле:

$$D' = (W \cdot F) / P. \tag{2}$$

Полученные данные сохраняются в виде 2D-массивов точек и поступают в качестве входных данных программе по обработке.

При выполнении работы использовалась веб-камера *Logitech HD Pro Webcam C920* с такими характеристиками: количество точек матрицы 3Мп; автоматическая фокусировка Carl Zeiss Tessar, 20 шагов; максимальное разрешение видео 1920×1080; максимальное количество кадров/сек 30.

Программная составляющая детектора социального дистанцирования. Кроме аппаратной части системы, для ее управления требуется программное обеспечение. Программная составляющая детектора социального дистанцирования основывается на функционале библиотеки OpenCV для работы с изображениями, глубоком обучении, детекторе объектов YOLO, программно-аппаратной архитектуре параллельных вычислений NVIDIA CUDA GPU. Глубокое обучение – область машинного обучения, которая рассматривает методы решения задач искусственного интеллекта с использованием глубоких нейронных сетей. Основная проблема применения глубоких нейросетей с большим количеством скрытых слоев – трудность обучения по причине исчезающего градиента: при использовании традиционных функций активации сигналы об обратнo распространяемых ошибках быстро становятся или очень малыми, или большими.

Для методов, основанных на глубоком обучении, используют главным образом архитектуру сверточных нейронных сетей (СНС) [8]. Этот тип ИНС обеспечивает устойчивость к изменению масштаба, повороту, смещению, смене ракурса, тем самым хорошо подходит для работы как со статическими, так и с динамическими изображениями (рис. 3).

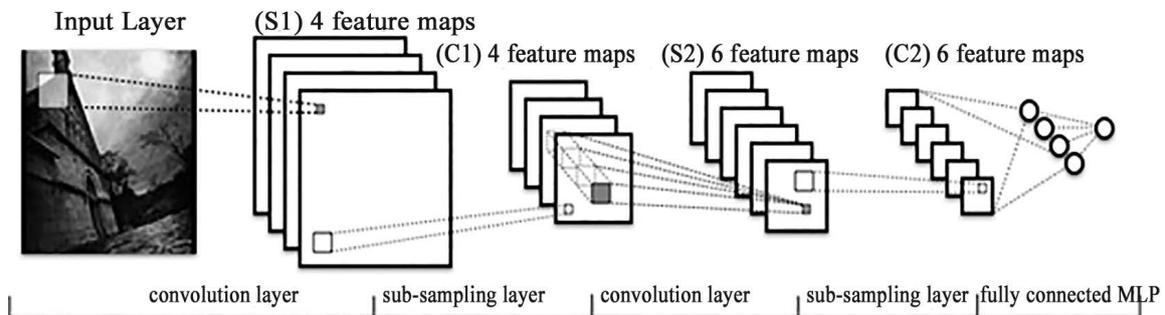


Рис. 3. Сверточная нейронная сеть

Fig. 3. The convolutional neural network

СНС позволяет обнаруживать объект без использования набора его специфических особенностей. Такая сеть обычно интерпретируется как переход от конкретных особенностей изображения к более абстрактным деталям. При этом сеть самоорганизуется и вырабатывает необходимую иерархию абстрактных признаков, фильтруя маловажные детали и выделяя существенные. Основная идея состоит в чередовании слоев и применении операции свертки. Первые два типа слоев (сверточные и субдискретизирующие), чередуясь между собой, формируют входной вектор признаков для «обычной» сети – персептрона. Для ускорения обучения на больших наборах данных рекомендуется распараллеливать вычисления на многоядерных процессорах и на графических процессорах GPU. NVIDIA CUDA GPU (Compute Unified Device Architecture) является программно-аппаратной архитектурой параллельных вычислений, которая позволяет существенно увеличить вычислительную производительность.

Для решения задачи обнаружения объектов использовалась сверточная нейронная сеть *YOLOv4*. По литературным данным [8], эта версия нейронных сетей более быстрая и точная для решения задач идентификации объектов в режиме реального времени; способна распознавать несколько объектов в одном кадре; может указывать граничную рамку вокруг объекта. Достигается это тем, что *YOLO* «прогоняет» изображение через СНС один раз, в отличие, например, от двухэтапных методов [9]. Изображение делится на сетку. Каждой ячейке сетки принадлежит область объекта на изображении, если центр области находится в пределах ячейки. Для каждой области определяется класс объекта и охватывающая рамка. Что касается оценки эффективности работы ИНС (показатели точности и скорости), то отметим следующее. Поскольку в данной статье представлены результаты исследовательской работы, а отладка проводилась с использованием вычислительных ресурсов CPU, можно говорить лишь о значительном увеличении производительности архитектуры *YOLO* при использовании GPU, включая распараллеливание алгоритмов. Обоснованные цифры будут приведены в следующей работе. С учетом этого разработана программа на языке Python, способная выполнять анализ как по стационарным видеоданным, так и в режиме реального времени.

Поскольку детектор дистанцирования разрабатывался под разные архитектуры, то в программной части предусмотрен ввод значений двух констант:

- логическое значение – указывающее (предполагается использование CPU или GPU в зависимости от этого корректируются параметры конфигурационного файла);
- минимальное расстояние (в пикселях) для соблюдения социальной дистанции.

Кроме того, предусмотрена обработка изображения как в реальном времени (видеопоток данных), так и в режиме симуляции (с файлом данных, подготовленным заранее). При использовании готового файла системой предусмотрена возможность подготовки измененного видеофайла с метками на анализируемых объектах. При разработке программы использовался алгоритм обработки из библиотеки TensorFlow [6]. Внесенные в алгоритм изменения позволяют сократить объем обрабатываемой информации за счет исключения факторов с малыми весами и реализовать дополнительный функционал.

Обучение сети в задаче детектирования проводилось на наборе данных CIFAR10. Набор данных имеет точность около 99,37 %, при обучении в 200 эпох. Разработанная же нами модель при обучении проходила 100 эпох, при этом точность составила 82 %.

Показатель точности выводился в программе; фрагмент кода приведен ниже:

```
score = model.evaluate(X_test, y_test,
                      batch_size=32, verbose=1)
print()
print(u'Оценка теста: {}'.format(score[0]))
print(u'Оценка точности модели: {}'.format(score[1]))
```

Для тестирования и получения результатов использовались кадры видеоизображений. Отобранный вручную набор был разбит на 3 класса в зависимости от наличия различных помех, условий освещенности, числа людей в кадре. Точность для всех классов составила в целом величину 79,7 %.

Программа позволяет получить следующие результаты:

- обнаруживать наличие объекта в видеопотоке;
- выделять ограничивающую рамку;
- определять центроиды для каждого обнаруженного человека;
- производить вычисление попарных расстояний между всеми центроидами;
- производить проверку, выдерживается ли рекомендуемое расстояние между объектами. Если обнаруживается, что парные расстояния менее N пикселей, то это означает, что пара людей нарушила правила социального дистанцирования (рис. 4).



Рис. 4. Применение детектора социального дистанцирования на практике:
слева – объекты, нарушающие дистанцию; справа – прошедшие обработку детектором

Fig. 4. Application of the social distancing detector in practice:
left – objects that violate the distance; right – objects that have been treated by the detector

Тестирование программы проводилось на CPU, но в коде предусмотрена возможность использовать графический процессор NVIDIA CUDA, который поддерживает режим реального времени, что позволяет использовать детектор в качестве мобильного прибора по проверке соблюдения норм дистанцирования.

Проектирование системы компьютерного зрения для альтернативного управления устройствами в виртуальной среде жестами руки. При создании автоматизированных систем с применением компьютерного зрения в первую очередь предполагается получать результаты обнаружения объектов при обработке видеоданных. Не менее важным элементом является организация естественного интерфейса «человек – техническое устройство», основанного на жестах, мимике, голосовых командах. Кроме того, возможна реализация зрительной обратной связи при работе управляемых устройств и созданию механических манипуляторов. Это особенно востребовано в робототехнике, в индустрии дополненной и виртуальной реальности, в обучающих системах.

Дополненная реальность – это среда, дополняющая реальный физический мир цифровыми данными с помощью каких-либо устройств. В такой среде виртуальные объекты проецируются на реальное окружение, а взаимодействие между реальными и виртуальными объектами создается с помощью компьютерного зрения.

В рассматриваемой части работы разработан и реализован алгоритм по созданию и функционированию компонента дополненной реальности, выполняющий функции регулятора звука и нажатия кнопок мыши.

Обнаружение ключевых признаков руки с использованием машинного обучения. Обнаружение ключевых признаков (точек) руки – это процесс нахождения суставов и кончиков пальцев на заданном изображении [10]. Для поиска ключевых точек предлагается использовать фреймворк *MediaPipe* с открытым исходным кодом [11], который помогает создавать мультимодальные конвейеры машинного обучения.

Структура *MediaPipe* состоит из трех основных компонентов – основа для вывода из данных конвейера, инструменты для оценки и набора повторно используемых компонентов логического вывода и обработки. Фактически *MediaPipe* использует модель однократного обнаружения руки (ладони). И как только границы ладони будут обнаружены, фреймворк выполняет точную локализацию ключевых точек в пределах границ и выдает координаты 21 точки. Таким образом, происходит захват двадцать одной точки выпуклых частей кисти (рис. 5).

Ключевые точки позволяют восстановить полную модель кисти по ее входному изображению. Это наиболее перспективный визуальный метод распознавания жестов, так как он подразумевает полное оценивание текущего положения и динамики руки. Но метод достаточно сложен для программирования «с нуля» и ограничен по точности восстановления изображения.

В конвейере *MediaPipe* используется несколько моделей. Одна из них – модель обнаружения ладони, которая возвращает ограничивающую и ориентированную в пространстве рамку руки на основе ее полного изображения [11].

Модель и реализованный для нее метод были взяты за основу и адаптированы в виде программного модуля на языке *Python* [12]. Входное изображение – реальная ладонь разработчика. Последовательные шаги реализации алгоритма следующие:

- 1) детектор определяет пространственную скелетную модель изображения руки;
- 2) с помощью ограничивающей рамки выделяется область, содержащая полезную информацию;
- 3) выделенная область подается на вход модели, определяющей ориентир руки. Результат – набор трехмерных координат скелета руки (рис. 5);
- 4) распознаватель жестов отыскивает конфигурацию 3D-координат в наборе жестов.

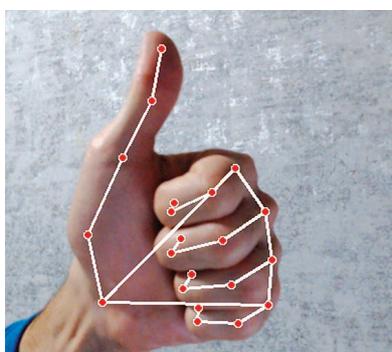


Рис. 5. Ключевые точки в 3D-измерении

Fig. 5. 3D key points

Правильно определенная форма ладони позволяет значительно ускорить решение задачи распознавания жестов, что приводит к сокращению размерности данных и возможности использовать такой алгоритм на одноплатных компьютерах.

При тестировании программного модуля были проведены эксперименты по регулировке звука и нажатию клавиш компьютерной мышки.

Управление звуком при помощи жестов. Модель руки создает локализацию руки на основе указанных ключевых точек. Результат локализации оформляется в виде программного модуля. При обращении к модулю на вход подается реальное изображение ладони. После обработки изображения будет получен массив данных (вектор) v , содержащий 3D-координаты 21 точки ладони.

Используя массив данных с координатами точек руки, на языке *Python* был реализован код, осуществляющий управление звуком жестами руки. Использовались элементы векторов указанных ключевых точек (рис. 6).

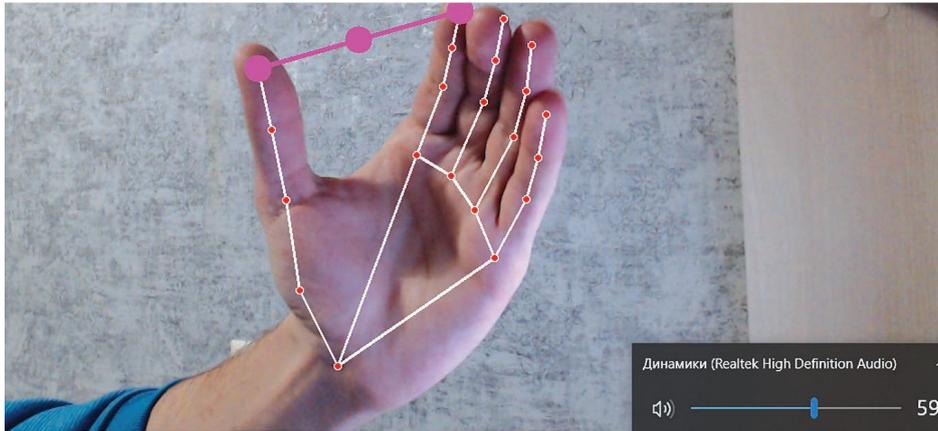


Рис. 6. Регулирование звука жестами

Fig. 6. Gesture-based audio control

При тестировании программного модуля замечено, что точность и скорость регулировки сильно зависят от расстояния между управляемым объектом и камерой.

По поводу определения расстояния стоит заметить, что на сегодняшний день нет алгоритма точного расчета такого расстояния [12]. Более того, нейронные сети принадлежат к непараметрическим моделям, поэтому мера сходства в виде функции расстояния здесь не используется.

Результаты проведенных экспериментов показали, что наилучшее расстояние от камеры $l \sim 500$ м. При уменьшении расстояния действий по регулировке требовалось меньше, но и точность падала. При увеличении расстояния произвести регулировку не удалось. Таким образом, в видеопотоке можно определить не абсолютный, а только относительный размер и расстояние между объектами.

Манипулирование двухкоординатной мышкой при помощи жестов. Ограничения обычной компьютерной мышки проявляются в том, что при 3D-проектировании уже недостаточно возможности манипуляций с объектом на плоскости. В качестве варианта решения такой проблемы предлагается управлять движением объекта с помощью жестов руки. Жесты позволяют организовать сложные типы движений, включая повороты. Кроме того, такой манипулятор может управлять удаленным объектом.

Реализация алгоритма по управлению движением жестами включает следующие шаги:

- получение выделяющей рамки руки и координат ключевых точек;
- соотношение координат поверхности с мышью и рамки руки;
- управление перемещением курсора и нажатием кнопок.

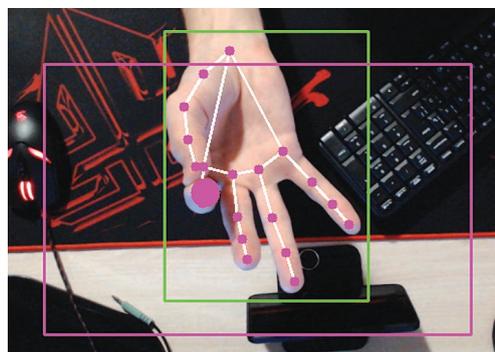


Рис. 7. Регулировка нажатий кнопок мышки

Fig. 7. Adjusting the mouse buttons

Как и в системе управления звуком, основная трудность при реализации состояла в корректном определении расстояния от камеры. Множеством экспериментов по определению расстояния было установлено, что, как и в предыдущем случае, расстояние от камеры $l \sim 500$ мм позволяло за минимальное число управляющих жестов добиться требуемого результата (рис. 7). С другой стороны, это позволит в дальнейшем комбинировать две разработанные модели в общую систему.

Заключение

Система компьютерного зрения как отрасль знания ориентирована прежде всего на практическое применение. Алгоритмы обработки изображений трудоемкие, их реализация требует большого объема расчетов. Еще более мощные вычисления требуются при обработке изображений в режиме реального времени. Учитывая, что основные приложения машинного зрения принадлежат к областям, где характеристики конструируемых устройств и по объему, и по стоимости должны быть небольшими, особый интерес представляет программная реализация для маломощных вычислительных устройств и аппаратно-программных комплексов.

В статье представлены результаты разработки макетов устройства, основанные на технологии компьютерного зрения с использованием СНС. Устройство предназначено для контроля соблюдения норм социального дистанцирования и может использоваться соответствующими службами в местах массового обслуживания людей.

Как перспективное и безопасное в области экологии направление практического применения технологии компьютерного зрения – альтернативное управление техническими устройствами с помощью команд, подаваемых жестами, голосом. В работе представлен и реализован алгоритм по созданию интерфейса «человек – компьютер», основанный на распознаваемых компьютером жестах и исключаящий «удобные» для компьютера клавиатуру и мышь. Преимущество такого типа управлений в том, что они работают в реальном времени, без специального оборудования, управляют устройствами, не касаясь их физически.

Проведена серия экспериментов по подбору оптимального расстояния от управляемого объекта до камеры с целью получения минимального по объему, но достаточного для идентификации действий набора данных. Конечная задача – реализация алгоритма на одноплатных компьютерах. К настоящему времени не разработаны в достаточной степени методы экспресс-анализа и сбора данных об окружающей среде, основанные на исследовании фото-, видео- данных, и реализованные в виде автоматизированных систем. Научная новизна работы состоит в совершенствовании методов и средств для автоматизации контроля за объектами окружающей среды на основе современных информационных технологий. Технологии компьютерного зрения – универсальный и мощный инструмент исследования, который можно применять в различных областях, в первую очередь к проблемам экологии. Однако сегодня реализация данной технологии в проектах и внедрение их в повседневную жизнь затруднена по ряду причин (недостаточная элементная база, финансовые риски и технофобия).

Библиографические ссылки

1. Bishop CM. Pattern Recognition and Machine Learning. New York: Springer-Verlag; 2006. 738 p.
2. Sense Time: Artificial Intelligence (AI) Software Provider [Интернет; процитировано 25 августа 2022]. URL: www.sensetime.com/en.
3. Ткаченко СВ, Смирнова ТВ. Совершенствование структуры искусственных нейронных сетей на базе вариационной оптимизации. В: Сахаровские чтения 2020: экологические проблемы XXI века». Часть 2. с. 322–326. DOI:10.46646/SAKH-2020-2-322-326
4. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики. Перцептроны и теория механизмов мозга. Москва: Мир; 1965. 302 с.
5. Duch, J, Hazan E, Singer Y. Adaptive Subgradient Methods for Online Learning and Stochastic Optimization. *Journal of Machine Learning Research*. 2011;5:2121–2159.
6. Popular Datasets Over Time [Интернет; процитировано 25 марта 2022]. URL: www.kaggle.com/code.
7. Бринк Х, Ричардс Дж, Феверолф М. Машинное обучение. Санкт-Петербург: Питер; 2018. 336 с.
8. Wang Ch, Bochkovskiy A., Liao M. Scaled-YOLOv4: Scaling Cross Stage Partial Network [Интернет; процитировано 25 августа 2022]. URL: <https://arxiv.org/abs/2011.08036v2>.
9. Boominathan L, Kruthiventi S, Babu R. CrowdNet: A Deep Convolutional Network for Dense Crowd Counting. *Proceedings of the 2016 ACM on Multimedia Conference*. Amsterdam, Netherlands. 2016: 640–644. DOI:10.1145/2964284.2967300
10. Cao Z, Xu X, Biao Z, Zhou M, Li Q. Real-time gesture recognition based on feature recalibration network with multi-scale information. *Neurocomputing*. 2019;347:119–130.
11. MediaPipe Python Framework [Интернет; процитировано 12 февраля 2022]. URL: <https://google.github.io/mediapipe/solutions/solutions.html>.
12. Шакирьянов ЭД. Компьютерное зрение на Python. Москва: Лаборатория знаний; 2021. 163 с.

References

1. Bishop CM. Pattern Recognition and Machine Learning. New York: Springer-Verlag; 2006. 738 p.
2. Sense Time: Artificial Intelligence (AI) Software Provider [Internet; cited 2022 August 25]. Available from: www.sensetime.com.
3. Tkachenko SV, Smirnova TV. *Sovershenstvovaniye struktury iskusstvennykh neyronnykh setey na baze variatsionnoy optimizatsii* [Improving of the structure of artificial neural networks based on variational optimization]. In: *Sakharovskie chteniya 2020: ekologicheskie problemy XXI veka. Part 2*. p. 322–326. DOI:10.46646/SAKH-2020-2-322-326. Russian.
4. Rosenblatt F. *Pprintsipy neyrodinamiki. Pertseptrony i teoriya mekhanizmov mozga* [Principles of neurodynamics. Perceptrons and the theory of brain mechanisms]. Moscow: Mir; 1965. 302 p. Russian.
5. Duch, J, Hazan E, Singer Y. Adaptive Subgradient Methods for Online Learning and Stochastic Optimization. *Journal of Machine Learning Research*. 2011;5:2121–2159.
6. Popular Datasets Over Time [Internet; cited 2022 March 25]. Available from: www.kaggle.com/code.
7. Brink H, Richards J, Feverolf M. *Mashinnoye obucheniye* [Machine learning]. Saint Petersburg: Piter; 2018. 336 p. Russian.
8. Wang Ch, Bochkovskiy A., Liao M. *Scaled-YOLOv4: Scaling Cross Stage Partial Network* [Internet; cited 2022 August 25]. Available from: <https://arxiv.org/abs/2011.08036v2>.
9. Boominathan L, Kruthiventi S, Babu R. CrowdNet: A Deep Convolutional Network for Dense Crowd Counting. *Proceedings of the 2016 ACM on Multimedia Conference*. Amsterdam, Netherlands. 2016: 640–644. DOI:10.1145/2964284.2967300
10. Cao Z, Xu X, Biao Z, Zhou M, Li Q. Real-time gesture recognition based on feature recalibration network with multi-scale information. *Neurocomputing*. 2019;347:119–130.
11. MediaPipe Python Framework [Internet; cited 2022 February 12] Available from: <https://google.github.io/mediapipe/solutions/solutions.html>
12. Shakiryanov ED. *Komp'yuternoye zreniye na Python* [Computer vision in Python]. Moscow: Knowledge Lab; 2021. 163 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 13.10.2022.
Received by editorial board 13.10.2022.

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 595.7:574.21;574.22;574.32

СТРУКТУРА ЭНТОМОКОМПЛЕКСОВ ОТКРЫТЫХ БИОТОПОВ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ В ПОСТМЕЛИОРАТИВНЫЙ ПЕРИОД

Т. П. СЕРГЕЕВА¹⁾, О. В. ЛОЗИНСКАЯ¹⁾, Е. Г. СМИРНОВА¹⁾

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

Дана оценка антропогенно детерминированной динамики энтомокомплексов, включающих ряд хозяйственно важных и биоценотически значимых групп насекомых (Insecta), являющихся компонентами открытых биоценозов поймы Припяти (Белорусское Полесье) в постмелиоративный период. Класс насекомых представлен 9-ю отрядами: стрекозы (Odonata), прямокрылые (Orthoptera), равнокрылые (Homoptera), полужесткокрылые (Hemiptera), жесткокрылые (Coleoptera), сетчатокрылые (Neuroptera), перепончатокрылые (Hymenoptera), двукрылые (Diptera), чешуекрылые (Lepidoptera) и двадцатью двумя семействами. Наиболее широко распространены представители шести отрядов насекомых – Diptera, Coleoptera, Orthoptera, Homoptera, Hemiptera. Во всех биотопах преобладают двукрылые (Diptera), доля которых составляет до 40 % от всех насекомых. По биомассе же всюду доминируют прямокрылые (Orthoptera).

Образец цитирования:

Сергеева ТП, Лозинская ОВ, Смирнова ЕГ. Структура энтомокомплексов открытых биотопов Белорусского Полесья в постмелиоративный период. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;4:15–32. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-15-32>

For citation:

Sergeeva TP, Lozinskaya OV, Smirnova EG. The structure of entomocomplexes of open biotopes of the Belarusian Polesie in the post-meliorative period. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;4:15–32. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-15-32>

Авторы:

Татьяна Павловна Сергеева – кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник.
Ольга Владиславовна Лозинская – старший преподаватель кафедры общей биологии и генетики.
Елена Геннадьевна Смирнова – старший преподаватель кафедры общей биологии и генетики.

Authors:

Tatyana P. Sergeeva, PhD (biology); leading researcher. sergeeva.t57@gmail.com
Olga V. Lozinskaya, senior lecturer at the department of general biology and genetics. aromia@rambler.ru
Elena G. Smirnova, senior lecturer at the department of general biology and genetics. e.smirnova@tut.by

Установлены закономерности изменения структуры энтомокомплексов исследованных биocenозов, а также качественного состава и количественных показателей (относительная численность и биомасса). Показано, что на выпасах численность жесткокрылых снизилась почти в 2,5 раза по сравнению с естественными лугами, а у полужесткокрылых и прямокрылых увеличилась, и на смену гигрофилам появились более сухололюбивые мезо- и ксерофильные виды. В агроценозах зарегистрирована высокая численность (на порядок выше, чем на естественных лугах) кобылки бело-полосой – *Chorthippus albomarginatus* (de Geer, 1773) – известного вредителя сельхозугодий. Отмечено исчезновение из сообществ кузнечиков – индикаторов «заповедности» с увеличением антропогенной нагрузки на биocenозы. Выявлена тенденция изменения структурно-функциональной организации энтомокомплексов, проявляющаяся в смене видов, различающихся гигропреферентом, а также в уменьшении доли хортобионтов и увеличении – геофилов. Происходит замещение гигрофильных стенобионтов мезофильными и мезо-ксерофильными видами и элементами степной (*Stenobothrus lineatus*), полупустынной (*Gomphocerippus rufus*) и даже пустынной (*Bryodemella tuberculata*) фауны. Появление чужеродных видов, представляющее потенциальную опасность массового размножения некоторых из них, объяснимо снятием барьера, каковым ранее являлись низинные болота. Установлена биоиндикационная значимость отдельных групп и видов насекомых, продемонстрированная на прямокрылых.

Ключевые слова: Белорусское Полесье; осушительная мелиорация; трансформированные биocenозы; открытые биотопы; биocenозы; насекомые; прямокрылые; структура энтомокомплексов; виды-индикаторы среды; биоиндикационная оценка.

Благодарность. Исследования поддержаны грантом Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Б17-143), что дает возможность продолжения работы в рамках задания Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограмма 10.3 «Радиация и биологические системы».

THE STRUCTURE OF ENTOMOCOMPLEXES OF OPEN BIOTOPES OF THE BELARUSIAN POLESIE IN THE POST-MELIORATIVE PERIOD

T. P. SERGEEVA^a, O. V. LOZINSKAYA^a, E. G. SMIRNOVA^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Dauhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: T. P. Sergeeva (sergeeva.t57@gmail.com)

The assessment of anthropogenically determined dynamics of entomocomplexes, including a number of economically important and biocenotically significant groups of insects inhabiting open biocenoses of the Pripjat floodplain (Belarusian Polesie) has been given. Some patterns in the formation of hortobiont arthropods complexes in natural and transformed habitats have been established. There have been registered the representatives of 2 classes – insects (Insecta) and arachnids (Arachnoidea) – in the studied territory. The insects are represented by 9 orders (and 22 families): dragonflies (Odonata), orthopterans (Orthoptera), homopterans (Homoptera), semi-coleopterans (Hemiptera), coleopterans (Coleoptera), neuropterans (Neuroptera), hymenopterans (Hymenoptera), dipterans (Diptera) and lepidopterans (Lepidoptera). The most widespread representatives of 6 orders of insects are Diptera, Coleoptera, Orthoptera, Homoptera, Hemiptera. Dipterans predominate in all biotopes, their proportion is up to 40 % of all insects. Orthopterans dominate by biomass everywhere. The structure of entomocomplexes in the studied biocenoses has been established: qualitative composition and quantitative characteristics (abundance and biomass). It is shown that the number of Coleoptera is reduced by almost 2.5 times on pastures compared to the control, while for Hemiptera and Orthoptera, on the contrary, increased. Hygrophiles are replaced by more meso- and xerophilous species. A high number of white-banded fully *Chorthippus albomarginatus* (De Geer, 1773), a well-known pest of farmland, has been recorded in agroecosystems (an order of magnitude higher than in natural meadows). The disappearance of grasshoppers (indicators of reserved state) from communities has been noted as the anthropogenic load on biogeocenoses increases. The tendency of changes in the structural and functional organization of entomocomplexes has been revealed, it manifests itself in the change of species differing in hygropreferendum. Thus, hygrophilous stenobionts are replaced by mesophilic and mesoxerophilic species and elements of steppe (*Stenobothrus lineatus*), semi-desert (*Gomphocerippus rufus*) and even desert (*Bryodemella tuberculata*) fauna. The bioindicational significance of individual groups and species of insects, demonstrated on orthopterans, has been established.

Keywords: Belarusian Polesie; drainage reclamation; transformed lands; open biocenoses; insects; orthopterans; environmental indicator species; bioindication assessment of the territory.

Acknowledgments. This study was supported by the Belarussian Republic Foundation for Fundamental Research (grant B17-143). The investigation is being continued as a research project of the of the State Scientific Research Program «Natural Resources and Environment», subprogram 10.3 «Radiation and Biological Systems».

Введение

Изменения, происходящие во всех сферах деятельности человека и в природной среде в начале XXI в, побуждают к анализу их причин и возможных последствий на всех уровнях существования материи.

Осуществление мероприятий по охране и рациональному использованию природных ресурсов предполагает как один из аспектов наличие данных о состоянии наиболее важных таксономических групп растений и животных в трансформированных биотопах. В настоящее время количество естественных ландшафтов невелико, что обусловлено коренным изменением среды и трансформацией природных комплексов в условиях действия различных по силе и характеру антропогенных факторов. Беларусь не является исключением в этом всепланетарном процессе, а одним из ее регионов, который в наибольшей степени подвергся глубокому изменению сложившихся природных комплексов, является Полесье.

Крупномасштабная осушительная мелиорация вызвала определенную трансформацию природной среды Полесского региона [1]. С одной стороны, последующая трансформация ландшафтов явилась весомым вкладом в развитие сельского хозяйства и оздоровление паразитологической ситуации, а с другой – имеет следствием коренное изменение природных биоценозов и превращение их в сельскохозяйственные угодья (выпасы и агроценозы), нарушает естественную картину пространственного распределения многих видов. Этот процесс сопровождается уменьшением видового разнообразия растительных и животных сообществ – гаранта устойчивости любого биоценоза, исчезновением аборигенных видов и появлением чужеродных, а также угрозой увеличения численности популяций некоторых видов-вредителей.

В связи с этим разработка концепции устойчивого развития любой территории ориентирована на решение одной из основных проблем современности – сочетание интенсивной хозяйственной деятельности и сохранение окружающей среды. Достижение и сохранение такого баланса предполагает познание биоценологических связей между основными компонентами биоценоза, а также выявление направленности изменений соответствующих растительных и животных сообществ, что может послужить основой для оценки состояния среды. Выявление же специфики и характера изменений сообществ в условиях интегрированного техногенного воздействия побуждает к использованию экологических подходов для нормализации функционирования экосистем, нарушенных негативным влиянием антропогенных факторов.

Результаты исследований по данной проблеме представлены в научных трудах энтомологов Беларуси: О. И. Мержеевской, Э. И. Хотько, А. Н. Литвиновой, Т. П. Панкевич, Р. В. Молчановой, Н. К. Лавровой, М. Н. Трухан, А. В. Бирг, М. И. Жабинской и др. Их работы содержат сведения по фауне и экологии отдельных групп насекомых, что послужило огромным вкладом в решение многих вопросов, анализ которых позволил определить имеющиеся пробелы и наметить пути дальнейшего изучения.

Одним из важнейших аспектов настоящего исследования явилось установление направленности процессов, происходящих в энтомокомплексах открытых биоценозов белорусского Полесья, преобразованных широкомасштабной осушительной мелиорацией, а также возможности применения насекомых в качестве биоиндикаторов состояния среды.

Цель исследования – выяснение особенностей структуры энтомокомплексов открытых биогеоценозов Полесского региона, трансформированных в результате осушительной мелиорации, и установление их биоиндикационной роли для оценки состояния среды.

Исторический аспект трансформации природных комплексов Белорусского Полесья. Изменение природы Белорусского Полесья, известного с древнейших времен как уникального природного комплекса Европы, прослежено в историческом аспекте [2], где показано значение Полесской низменности, являющейся регулятором гидрологических, биологических, геохимических и других природных процессов на огромном пространстве в центре Европы и прилегающих территориях. Отмечена роль основной водной артерии – р. Припять с ее многочисленными притоками, хорошо развитой поймой со свойственным ей разнообразием растительных и животных сообществ. Необходимость проведения в этом регионе водно-земельной мелиорации в течение продолжительного исторического периода определялась своеобразием географических условий, прежде всего заболачиванием территории, сдерживающим поступательное развитие сельского хозяйства и усугубляющим паразитологическую ситуацию. В последней четверти XIX в. Западная экспедиция И. И. Жилинского и Е. В. Оппокова, выполнив большой объем изыскательских работ, положила начало комплексному изучению Полесского региона. Масштабы мелиоративных работ в Полесье на этом этапе были крупнейшими в мировой практике осушения болот.

В 50–60-е годы XX в. осушительная мелиорация болот Полесской низменности была ориентирована на их преимущественное использование под пахотные угодья. А уже в 70-х годах были выполнены научно-исследовательские работы по оценке влияния осушительных мелиораций на природу Полесья. Их результаты послужили основой для корректировки мелиоративного и гидротехнического строительства. Окончание XX в. ознаменовалось возросшим интересом к проблеме изменения природы Белорусского Полесья под влиянием осушительной мелиорации, так как этот регион оказался полигоном, на котором

более двух веков проводились интенсивные мероприятия по его освоению, апробировались различные способы и нормы осушения, орошения и использования переувлажненных угодий [2]. К настоящему времени общая площадь осушенных земель в Белорусском Полесье составляет около 2 млн га [3].

Результаты изучения насекомых и почвенной мезофауны Полесья. Белорусскими учеными, исследовавшими влияние осушительной мелиорации на растительные сообщества, а также фаунистические комплексы насекомых и почвенных беспозвоночных, оказавшихся в постмелиоративных условиях, установлено, что этот процесс сопровождается глубинными изменениями их качественной и количественной структуры [4–9] как в Белорусском Полесье, так и Белорусском Поозерье [5].

Основное направление проводившихся ранее исследований – изучение состава беспозвоночных (преимущественно чешуекрылых и жесткокрылых), а также представителей почвенной мезофауны в лесных и болотных биогеоценозах [10–16].

Результаты изучения энтомокомплексов и отдельных систематических групп насекомых естественных и трансформированно измененных территорий представлены в научных статьях, каталогах и монографиях [17; 19–24].

Позднее изучение динамики структуры сообществ открытых биогеоценозов (болотных, луговых и агроценозов) осуществлялось для одной из модельных групп наземных членистоногих – прямокрылых насекомых (Orthoptera) – на заповедных и антропогенно трансформированных территориях [25; 26; 27], то есть в экологически разнородных условиях. Отмечено, что важная хозяйственная роль и экологическая значимость принадлежит видам, способным к расширению ареалов, внезапному повышению численности их популяций, оказавшихся в результате деятельности человека в благоприятных для них условиях.

Аналитический обзор полученных результатов по изучению влияния осушительной мелиорации на природу Белорусского Полесья отразил диапазон глубинных изменений растительного и животного мира этого региона [28].

Материалы и методы исследований

Наши исследования, начатые еще в 1880-х гг., являлись планомерными и ежегодными до начала XXI в., а также продолжают по настоящее время. Они проводились на болотах, естественных пойменных лугах, осушенных и используемых под сельскохозяйственные угодья землях – в агроценозах и на выпасаемых лугах.

Объектами служили представители всех отрядов насекомых во всем спектре исследованных биоценозов: отдельные виды отрядов стрекоз (Odonata), прямокрылых (Orthoptera), равнокрылых (Homoptera), полужесткокрылых (Hemiptera), жесткокрылых (Coleoptera), сетчатокрылых (Neuroptera), перепончатокрылых (Hymenoptera), двукрылых (Diptera) и чешуекрылых (Lepidoptera).

Наиболее полно и за многолетний период была прослежена на видовом уровне антропогенно индуцированная динамика отряда прямокрылых (Orthoptera) всего ряда открытых биоценозов Полесского региона – естественных и трансформированных.

Материал собирали на территории, находящейся в настоящее время в границах Национального парка «Припятский», а также на полюдерных системах в окрестностях населенного пункта Хорск Столинского р-на; Хлупин Лельчицкого р-на, Хвоенск Житковичского р-на, а также на естественных и трансформированных болотах поймы р. Ясельды (Пружанский р-н Брестской обл.) Республики Беларусь. Собрано более 40 тыс. экземпляров членистоногих различных систематических групп.

Сбор насекомых осуществляли стандартными методами по общепринятым методикам: отряхивание кустарников, ручной сбор для кузнечиковых и сверчков, а также метод кошения стандартным энтомологическим сачком с диаметром обруча 30 см [29].

Таксономическую принадлежность устанавливали до уровня отрядов и семейств, а в отдельных случаях (отряд Orthoptera) – до видового уровня.

Для определения относительной численности беспозвоночных учет проводился методом кошения стандартным энтомологическим сачком [30] с использованием съемных мешочков [31] на участках с однородной растительностью и микрорельефом.

За единицу учета принималось количество насекомых, собранных на 1 м² в 25-кратной повторности на типичных участках мезорельефа [31], а также по усовершенствованной нами методике за единицу учета принималось количество насекомых на экспериментальных площадках размером 25 м² (1/400 га) в 10-кратной повторности. При таком количестве проб величина относительной ошибки средней арифметической не превышала 0,1–0,2 (10–20 %), что достаточно для получения достоверных результатов при изучении распределения организмов в полевых условиях [32].

Данные по биомассе получали путем взвешивания особей на торсионных весах. Для оценки изменений в сообществах саранчовых под воздействием различных типов антропогенной нагрузки на биоценозы использовали биоценологические показатели: *H* – индекс видового разнообразия Шеннона – Уивера [33], а также показатель доминирования Симпсона [34], отражающий тенденции изменения видового разнообразия в биотопе.

Статистическую обработку данных исследования проводили с использованием электронных таблиц *Microsoft Office Excel*.

Результаты исследования и их обсуждение

Гидромелиоративное преобразование природных комплексов, перевод больших площадей заболоченных территорий в сельскохозяйственные угодья, строительство польдерных систем в пойме Припяти способствовали не только улучшению земель, но и приводили к коренному преобразованию водного, теплового, агрохимического режимов территорий, а также глубокому изменению пространственной структуры и внешнего облика ландшафтов. Это не могло не отразиться на таксономическом разнообразии и структурно-функциональной организации животного населения, в том числе насекомых.

Структура энтомокомплексов Припятского ландшафтно-гидрологического заповедника (ныне Национальный парк «Припятский») и трансформированных земель. Полученные данные, представленные в табл. 1, позволили выявить качественную и количественную структуру энтомокомплексов изучаемых биоценозов.

Таблица 1

Средняя относительная численность (экз./га) за сезон насекомых естественных лугов и трансформированных биоценозов поймы р. Припять (май – сентябрь, 1987 г.)

Table 1

The average number (specimens per/ha) of insects of natural meadows and transformed habitats in the river Pripyat floodplain (May – September, 1987 г.)

Таксон	Естественный пойменный луг	Выпасаемый луг	Посевы ежи сборной
Odonata	200	600	50
Orthoptera	6500	4800	6800
Tettigoniidae	300	200	172
Tetrigidae	200	600	–
Acrididae	6000	4000	6628
Homoptera	1600	4400	6280
Hemiptera	3960	6400	4100
Coleoptera	5765	2200	2852
Carabidae	180	80	–
Hydrophilidae	40	–	–
Staphylinidae	120	40	–
Pselaphidae	25	–	30
Scarabaeidae	–	60	–
Helodidae	100	30	50
Byrrhidae	20	–	–
Cantharidae	350	70	40
Elateridae	320	–	–
Nitidulidae	440	220	160
Coccinellidae	420	150	200
Mordellidae	20	–	–
Cerambycidae	–	60	20
Chrysomelidae	1270	1010	950
Curculionidae	2960	960	1230
Species	540	260	372
Neuroptera	20	60	25
Hymenoptera	4000	2400	2200
Symphyta	1600	1000	560
Apocrita	2400	1400	1640
Diptera	13400	11000	8600
Trichoptera	10	–	–
Lepidoptera	1600	560	520
Tortricidae	100	200	30
Pyralidae s. l.	1000	200	–
Geometridae	300	240	20
Noctuidae	200	100	470
INSECTA	38060	33160	31934

Из данных табл. 1 следует, что насекомые – обитатели различных категорий лугов поймы Припяти представлена 9-ю отрядами: Odonata, Orthoptera, Homoptera, Hemiptera, Coleoptera, Neuroptera, Hymenoptera, Diptera, Lepidoptera и 22-мя семействами.

Наиболее многочисленны представители 6-ти отрядов насекомых – Diptera, Coleoptera, Orthoptera, Homoptera, Hemiptera, Hymenoptera. Представители таких отрядов, как Odonata и Neuroptera, немногочисленны, стрекозы встречаются преимущественно на лугах и единичными экземплярами, сетчатокрылые же повсеместно – единичными экземплярами.

Представительство отдельных отрядов в структуре комплексов наземных членистоногих неравноценно: во всех биотопах преобладают двукрылые (Diptera), доля которых составляет до 40 %. Наибольшей биомассой (рис. 1) всюду характеризуются прямокрылые (Orthoptera).

Равнокрылые представлены видами из подотрядов тлей (Aphidinea) и цикадовых (Cicadinea). Среди жесткокрылых наибольшей относительной численностью характеризуются листоеды (Chrysomelidae), долгоносики (Curculionidae) и божьи коровки (Coccinellidae). Высокая относительная численность прямокрылых обусловлена массовостью представителей семейства саранчовых (Acrididae), среди которых есть и такие вредители сельскохозяйственных культур, как кобылка белополосая (*Chorthippus albomarginatus*), присутствуют виды-индикаторы условий среды: стенобионтные ксерофилы и гигрофилы, а также виды-эврибионты. Отряд чешуекрылых представлен семействами листовёрток (Tortricidae), огневка (Pyralidae), пядениц (Geometridae) и совок (Noctuidae). Довольно высокая относительная численность Pyralidae зарегистрирована на естественном пойменном лугу (1000 экземпляров на гектар) и Noctuidae – на посевах ежи сборной (470 экз./га). Невысокая численность в открытых биотопах представителей семейства Geometridae и Tortricidae объясняется их тяготением к лесным биотопам и древесной растительности.

В энтомокомплексах естественных пойменных лугов Припятского ландшафтно-гидрологического заповедника доминируют двукрылые (Diptera), относительная численность которых вдвое выше, чем жесткокрылых (Coleoptera) и прямокрылых (Orthoptera), и составляет 13400, 5765 и 6500 экземпляров на гектар соответственно. У перепончатокрылых (Hymenoptera), полужесткокрылых (Hemiptera) и чешуекрылых (Lepidoptera) этот показатель несколько ниже – 4000, 3960 и 1600 экз/га.

Среди жесткокрылых гигрофильностью выделялись представители семейств Hydrophilidae, Byrrhidae, Helodidae и Chrysomelidae (*Donacia* F.). У прямокрылых индикаторами высокой влажности явились виды из семейств Tettigoniidae (*Conocephalus* Thunb.) и Acrididae (*Mecostethus* Fieb и *Chorthippus* Fieb). У перепончатокрылых (п/отряд Symphyta) присутствуют виды родов *Dolerus* Panz., *Eutomostethus* Enslin., *Pachyprotasis* Htd. и *Pachynematus* Knw., у чешуекрылых (сем. Noctuidae) – виды из п/семейств Plusiinae (*Plusia* Ochs.), Hadeninae (*Heliophobus* Bsd., *Orthosia* Ochs.), Cuculliinae (*Xylena* Ochs), Panthelinae (*Ipomorpha* Hbn.). Наличие на пойменном лугу гигрофильных стенобионтов – индикаторов высокой влажности и разнообразие таксономического состава свидетельствуют о минимальной нарушенности этих биотопов.

На пойменных лугах, используемых под выпас, отличия в структуре энтомокомплексов, определяемых этим фактором, проявились в следующем: численность жесткокрылых ниже почти в 2,5 раза и составила 2200 экз./га. Относительная численность полужесткокрылых выше и достигает 6400 экз./га. Доля прямокрылых ниже на треть, их относительная численность находится на одном уровне с Homoptera (4800 и 4400 экз./га соответственно). Отсутствие кузнечиков, характерных для ненарушенных биотопов, является свидетельством антропогенно измененных условий. Различны качественная и количественная структура комплексов перепончатокрылых и чешуекрылых, их относительная численность достигает до 2400 и 560 экз./га.

Освоение земель с размещением на них посевов сельскохозяйственных культур ведет к снижению увлажненности, а наличие монокультуры является определяющим фактором и сказывается на изменении структуры населения насекомых всех таксонов. Так, на кормовых травах (еже сборной) для тепло- и сухолюбивых прямокрылых и равнокрылых отмечена самая высокая численность (6800 и 6280 экз./га соответственно). У полужесткокрылых и жесткокрылых численность составила 4100 и 2852 экз./га соответственно. Двукрылые, доминирующие в луговых биоценозах (13400 экз./га), несколько малочисленнее (11000 экз./га) на выпасаемом лугу и их численность существенно уменьшается в агроценозах – до (8600 экз./га). На мелиорированных участках также ниже относительная численность сидячебрюхих перепончатокрылых (Symphyta) (560 экз./га против 1600 экз./га на немелиорированных), у стебельчатобрюхих (Aroscrita) (1640 экз./га и 2400 экз./га соответственно).

Отсутствие на выпасах и в агроценозах в составе энтомокомплексов представителей некоторых семейств обусловлено существенным изменением почвенно-растительного покрова однообразием растительного покрова на монокультурах.

Данные другого количественного показателя структурной организации энтомокомплексов, характерных для естественных и окультуренных биоценозов – биомассы, являющейся важнейшим звеном трофических взаимоотношений, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Средняя биомасса (г/га) за сезон энтомокомплексов естественных лугов
и трансформированных биоценозов в пойме р. Припять (май – сентябрь, 1987 г.)

Table 2

The average biomass (g/ha) of entomocomplexes of natural meadows,
transformed biocenoses, in the floodplain of the river Pripyat (May – September, 1987)

	Таксон	Естественный пойменный луг	Выпасаемый луг	Посевы кормовых трав
1	Odonata	2,6	1,4	0,4
2	Orthoptera	249,0	164,0	548,4
3	Homoptera	2,3	7,2	8,1
4	Hemiptera	27,5	9,7	10,4
5	Coleoptera	65,7	23,5	17,3
6	Neuroptera	0,5	0,5	0,1
7	Hymenoptera	34,3	15,0	9,7
8	Diptera	70,9	3,0	17,6
9	Lepidoptera	22,0	7,5	10,1
	Всего	474,8	231,4	631,5

Из данных табл. 2 следует, что наибольшая общая биомасса всех насекомых зарегистрирована на кормовых травах. Биомасса у прямокрылых в агроценозах превышала этот показатель на естественном лугу более чем в 2 раза и почти втрое – на выпасаемом.

В распределении между биотопами ключевых таксонов наблюдаются определенные различия, обусловленные разнообразием экологических ниш и пищевых потребностей их обитателей, что отражают данные табл. 1 и 2. Всюду по численности и биомассе доминируют фитофаги. Среди жесткокрылых (Coleoptera) преобладают растительноядные формы: долгоносики (Curculionidae), щелкуны (Elateridae) и листоеды (Chrysomelidae). Зоофаги представлены представителями семейств жуужелиц (Carabidae) и божьих коровок (Coccinellidae); сапрофаги – среди прочих стафилинидами (Staphylinidae). Среди представителей отряда перепончатокрылых (Hymenoptera) большую долю составляют зоофаги (Apsocrita), к фитофагам относятся пилильщики (Symphita). Все представители отряда чешуекрылых (Lepidoptera) также являются фитофагами, как и все саранчовые (Acrididae) из отряда прямокрылых (Orthoptera). Другие же представители этого отряда – кузнечики (Tettigoniidae) – имеют смешанный тип питания: растительноядный и хищничество, а самые древние прямокрылые, тетрикссы (Tetrigidae) – сапрофитный.

Структура энтомокомплексов польдерных систем. Исследования энтомокомплексов проводились на нескольких польдерных системах в пойме Припяти. В табл. 3 для таксонов высших рангов приводятся данные количественной структуры (численность) в местах их обитания на польдерной системе в окрестностях пос. Хорск Столинского р-на.

Таблица 3

Средняя относительная численность (экз./га) пауков и насекомых
основных отрядов – обитателей травостоя польдерной системы (май – сентябрь, Хорск, 1987 г.)

Table 3

Average density (specimens /ha) of horticont spiders and insects belonging to key orders
in meadow and fodder grass fields at of the polder system (May – September, Khorsk, 1987)

	Таксон	Выпасаемый луг	Посевы тимофеевки	Посевы ежи сборной
1	Odonata	60	100	100
2	Orthoptera	3010	150	1600
3	Homoptera	2440	50	200
4	Hemiptera	3800	440	500
5	Coleoptera	2520	3400	2150
6	Hymenoptera	1360	1240	280
7	Diptera	17760	6900	17000
8	Lepidoptera	880	50	200
	Всего	31830	12330	23230

Данные табл. 3 свидетельствуют, что состав энтомокомплексов открытых биотопах пolderной системы, включающей выпасаемый луг и агроценозы (посевы тимофеевки, ежи сборной), представлен 8-ю отрядами насекомых (Insecta). Наибольшая относительная численность во всех биоценозах отмечена у Diptera: 17760, 17000 и 6900 экз./га на выпасаемом лугу, посевах ежи сборной и тимофеевки соответственно. Наиболее низкая относительная численность характерна для представителей отряда стрекоз (Odonata), а также чешуекрылых (Lepidoptera). Относительная численность прямокрылых (Orthoptera), равнокрылых (Homoptera), жесткокрылых (Coleoptera) и перепончатокрылых (Hymenoptera) была достаточно высокой и различалась между биотопами незначительно. У прямокрылых же наибольшая относительная численность зарегистрирована на выпасаемом лугу, вдвое меньше (но также высокое значение) этого показателя для посевов ежи сборной и в 20 раз меньше – тимофеевки, что объяснимо с точки зрения предпочтений представителей этой группы по отношению к теплу и освещенности.

Самая высокая относительная численность представителей всех таксонов насекомых была зарегистрирована на выпасаемом лугу: более 32000 экз./га, наименьшая – на посевах тимофеевки – более 12000 экз./га, промежуточное значение показателя отмечено для посевов ежи сборной – 23230 экз./га.

Другой количественный показатель структуры энтомокомплексов – биомасса, подчиняется закономерности, выявленной для относительной численности, однако корректируется средними размерами и массой тела представителей отдельных таксонов (рис. 1). Так, относительная численность двукрылых на выпасаемом лугу более чем в 5 раз превышает этот показатель у прямокрылых, но биомасса и тех и других имеет практически идентичные значения, так как некоторые представители отряда прямокрылых отличаются более крупными размерами.

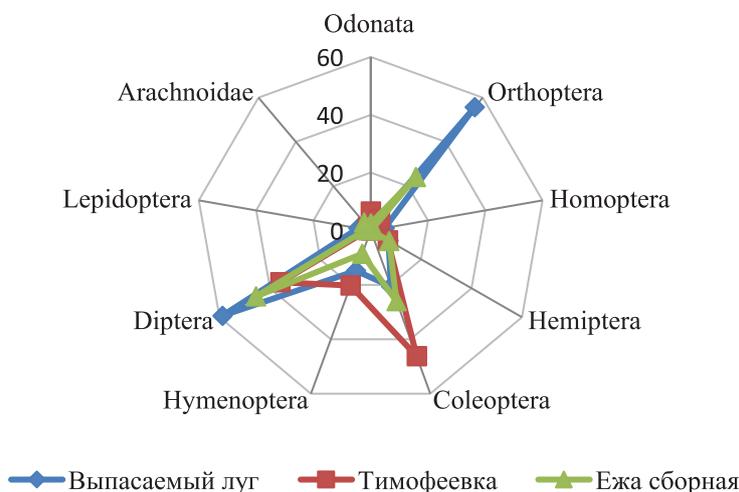


Рис. 1. Средняя биомасса (г/га) насекомых – основных обитателей травостоя лугов и посевов кормовых трав на пolderной системе (май – сентябрь, пос. Хорск, 1987 г.)

Fig. 1. Average biomass (g/ha) insects belonging to key orders in meadow and fodder grass fields at the polder system (May – September, Khorsk, 1987)

Высокие значения показателя средней биомассы свойственны двукрылым на выпасаемом лугу, несколько меньшие – на посевах ежи сборной и значительно меньшие – на тимофеевке. Наибольшее значение этого показателя было у жесткокрылых на посевах тимофеевки. Биомасса же прямокрылых, как и двукрылых была высокой на выпасаемом лугу.

Состояние комплексов прямокрылых экологически разнотипных биотопов поймы Припяти.

Результаты выполненного исследования проанализированы с точки зрения современной антропогенно детерминированной динамики сообществ прямокрылых насекомых. Они являются одной из биоценологически и хозяйственно важных групп животных, обладающих, благодаря наличию полиморфных признаков, широкими адаптивными возможностями, а также включающей реальных и потенциальных вредителей различных культивируемых и иных хозяйственно ценных растений.

На примере модельной группы – прямокрылых (Orthoptera), входящей в состав энтомокомплексов всех исследованных биоценозов, продемонстрировано изменение динамики структуры их сообществ под влиянием антропогенных факторов разной силы и направленности, а также отмечена их роль в качестве биоиндикаторов среды. Распространение прямокрылых по всем открытым биотопам южной части Беларуси и их доля в экологическом спектре в зависимости от условий среды представлено в табл. 4.

Таблица 4

Биотопическая приуроченность и относительная численность (в %) прямокрылых (Insecta: Orthoptera) разнотипных биотопов Полесского широколиственно-соснового ландшафта (1984–2000 гг.)

Table 4

Biotope spreading and relative abundance (in %) of orthopterans (Insecta: Orthoptera) of different biotopes of the Polessie broad-leaved-pine landscape (1984–2000)

	Вид	Биотопы						
		неосушенные болота	пойменные луга	осушенные неосвоенные болота	посевы трав		сосняки	рудеральные биотопы
					тимофеевка	ежа		
1	<i>Conocephalus dorsalis</i> Latr.	0,9	1,8					
2	<i>C. fuscus</i> Fabr.	23,8	5,4					
3	<i>Phaneroptera falcate</i> Poda.						0,1	
4	<i>Decticus verrucivorus</i> L.		1,7	+				
5	<i>Bicolorana bicolor</i> Phil.		1,4	+				
6	<i>Metrioptera brachiptera</i> L.			+				
7	<i>Roeseliana roeseli</i> Hag.		2,0	+				
8	<i>Tettigonia cantans</i> Fuesl.		3,5	+				
9	<i>T. viridissima</i> L.		1,4	0,1				
10	<i>Gryllus campestris</i> L.			7,9				
11	<i>Gryllotalpa gryllotalpa</i> L.			5,1				
12	<i>Tetrix bipunctata</i> L.		3,6	2,7	+		10,3	+
13	<i>T. subulata</i> L.		4,3	3,0	+	2,4		
14	<i>T. tenuicornis</i> Sahalb.			+				+
15	<i>Arcyptera fusca</i> Pall.							+
16	<i>Pararcyptera microptera</i> Fisch.							+
17	<i>Chorthippus albomarginatus</i> Deg.	4.8	6.4	12.3	8.0	87.5		+
18	<i>Ch. dorsatus</i> Zett.		5.3			+		+
19	<i>Chorthippus parallelus</i> Zett.	19.0	13.1			6,6		
20	<i>Glyptobothrus apricarius</i> L.		5.4	15.8	16.7		10.3	+
21	<i>Gl. biguttulus</i> L.		4,6	13,7	14,7	+	9,5	+
22	<i>Gl. brunneus</i> Thunb.		5,4	14,0	19,2	3,5	13,8	+
23	<i>Gl. mollis</i> Charp.			2,6				+
24	<i>Gomphocerus rufus</i> L.							+
25	<i>Myrmeleotettix maculatus</i> Thunb.			7,6			11,0	+
26	<i>Omocestus haemorrhoidalis</i> Charp.			9,1			17,0	+
27	<i>O. petraeus</i> Bris.			5,1			10,1	
28	<i>O. ventralis</i> Zett.						0,4	+
29	<i>O. viridulus</i> L.		9,2		35,4		0,2	
30	<i>Stenobothrus lineatus</i> Panz.			+				
31	<i>St. nigromaculatus</i> H - S.			+			+	
32	<i>St. stigmaticus</i> Ramb.			+				+
33	<i>Caliptamus italicus</i> L.			+				+
34	<i>Podisma pedestris</i> L.						+	
35	<i>Bryodemella tuberculatum</i> Fabr.							+
36	<i>Celes variabilis</i> Pall.							+
37	<i>Oedipoda coerulescens</i> L.						6.9	
38	<i>Aiolopus thalassinus</i> Fabr.	0,1	0,9					
38	<i>Epacromius coerulipes</i> Iv.			0,1				+
39	<i>Psophus stridulus</i> L.						3,4	+
40	<i>Sphingonotus coerulans</i> L.							+
41	<i>Stethophyma grossum</i> L.	51,4	21,1					

Примечание. Знаком «+» отмечены редкие виды или встречающиеся единичными экземплярами.

В табл. 4 рассматривается распределение представителей 2-х подотрядов прямокрылых: длинноусых (Ensifera), включающих виды семейств Tettigoniidae, Gryllidae и Gryllotalpidae и короткоусых (Caelifera), представленных видами 2-х семейств – Tetrigidae и Acrididae в поймы Припяти. Приводятся данные средней численности (в %) за сезон всех видов, обитающих в экологическом различающихся условиях – естественных и антропогенно измененных.

Характерные ранее для Полесского ландшафта болота, преобразованные в процессе осушительной мелиорации в окультуренный ландшафт, занимающие в настоящее время незначительную часть территории, характеризуются высокой влажностью и преобладанием в растительном покрове осок (*Carex*), присущих биотопам с высокой влажностью. Как следует из табл. 4, состав прямокрылых этих биотопов небогат в видовом отношении и представлен преимущественно гигрофильными видами, а также частично мезофильными. Группировка состоит всего из 6 видов, относящихся к двум семействам: Tettigoniidae и Acrididae. Доминируют три вида – *Stethophyma* (чуть более 50 %), *Conocephalus fuscus* (23,8 %) и *Chorthippus parallelus* (19,0 %). На границе болота с опушкой леса встречается летунья обыкновенная (*Aiolopus thalassinus*) – подпокровный геофил, доля которого в группировке (0,1 %). Виды, входящие в состав прямокрылых болотных биоценозов, по своей фенологии являются летне-осенними.

Пойменные луга также относятся к влажным биотопам, содержащими в растительном покрове много ценных луговых трав, высокий густой травостой которых отличается многообразием флористического состава. Здесь произрастают представители семейства лютиковых (лютик едкий), мотыльковых (чина луговая, мышиный горошек), гвоздичных (горичвет) и других видов растений.

Группировка прямокрылых, как и растительность пойменных лугов, значительно разнообразнее, чем на болотах и включает 41 вид из 3-х семейств: Tettigoniidae, Tetrigidae и Acrididae. Доминируют *Stethophyma grossum*, *Chorthippus parallelus* и *Omocestus viridulus*: 21,1 %, 13,1, 9,2 % соответственно. Травянка зеленая в сообществе прямокрылых влажных биотопов полесского ландшафта заметно многочисленнее, чем в группировках подтаежного, что объяснимо с точки зрения смены местообитания, когда мезофильные виды в условиях более теплого климата предпочитают более влажные места обитания.

Весной заметным компонентом сообщества становятся представители Tetrigidae: *Tetrix bipunctata* и *Tetrix subulate*, доля которых составляет 3,6 и 4,3 %. Первый вид на юге региона встречается во влажных местах в отличие от популяций, обитающих в северной части Беларуси на сухих участках. Осенью фоновыми видами являются кузнечики из рода конусоглавы и кобылка болотная. Редка и немногочисленна летунья обыкновенная – *Aiolopus thalassinus* (около 1 %). И на границе биотопа встречаются коньки из родов *Chorthippus* и *Glyptobothrus*.

Для биотопов, населенных преимущественно гигростенобионтными и гигрофильными видами (в меньшей степени мезофильными), характерно наличие 8-ми константных видов *Conocephalus fuscus*, *Tetrix subulata*, *Tetrix bipunctata*, *Omocestus viridulus*, *Chorthippus parallelus*, *Chorthippus albomarginatus*, *Stethophyma grossum* и *Aiolopus thalassinus*, которые отличаются степенью гигрофильности и удельным обилием.

Осушенные и не вовлеченные в хозяйственную деятельность луга занимают незначительные площади и покрыты сетью мелиоративных каналов. По набору растений напоминают осоково-злаковые с разнотравьем луга.

Группировка прямокрылых на таких участках включает наибольшее количество видов (24), являющихся в основном мезоксерофильными и относящимися к 4-м семействам: Tettigoniidae, Gryllidae, Tetrigidae и Acrididae, а также наибольшим разнообразием жизненных форм (7). Доминируют пластичные эврибионты: *Glyptobothrus apricarius* 15,8 %; *Gl. brunneus* – 14,0; *Gl. biguttulus* – 13,7 и *Chorthippus albomarginatus* – 12,3 %. Субдоминантами являются *Omocestus haemorrhoidalis*, *Gryllus campestris*, *Myrmeleotettix maculatus*, *Omocestus petraeus*, составившие в процентном отношении ряд по степени убывания 9,1; 8,3; 7,9 и 7,6. Виды семейств кузнечиковых и саранчовых, относятся к злаковым и факультативным хортобинтам, а из семейства Gryllidae – *Gryllus campestris* – сверчок полевой – к норным геофилам.

Численность остальных видов невелика, в спектре жизненных форм относятся к подпокровным геофилам (*Decticus verrucivorus*), другие – к злаковым (*Roeseliana roeselii*, *Stenobothrus stigmaticus*, *St. lineatus*, *Omocestus petraeus*, *Glyptobothrus mollis*) и факультативным (*Omocestus viridulus*) хортобионтам, а также – к герпетобионтам (*Tetrix bipunctata*). Разнообразие условий обитания этого биотопа, обусловленное наличием мезофитных и ксерофитных микростадий, определило существование многовидовой группировки с широким спектром жизненных форм.

Посевы кормовых трав на осушенных землях представлены сеяними культурами тимофеевки и ежи сборной. Наиболее экстремальные условия для прямокрылых обнаруживаются на посевах тимофеевки с ее высоким густым травостоем, слабой инсоляцией и отсутствием открытых участков. В таких условиях обитает группировка, включающая всего 7 видов из двух семейств: Tetrigidae (*Tetrix bipunctata*, *T. subulata*)

и Acrididae (*Chorthippus albomarginatus*, *Glyptobothrus brunneus*, *Gl.biguttulus*, *Gl.apricarius*, *Omocestus viridulus*). В спектре жизненных форм к герпетобионтам принадлежит 1 вид, злаковым – 3 и факультативным – также 1 вид. Численность в целом невысокая.

В другом агроценозе – посевах ежи сборной доминировал один вид – кобылка белополосая (*Chorthippus albomarginatus*), численность которой была на порядок выше, чем на посевах тимофеевки и значительно более, чем на болотах. На примере этого вида – одного из опасных вредителей, следует, что в благоприятной среде он способен к массовому размножению.

В сосняках и рудеральных биотопах насчитывается 14 и 21 вид соответственно, причем в последних много чужеродных видов представителей степной и полупустынной фауны: *Gomphocerus rufus*, *Arcyptera fusca*, *Pararcyptera microptera*, *Celes variabilis*, *Bryodemella tuberculatum*, *Sphingonotus coeruleans*.

Структурные преобразования комплексов прямокрылых (Orthoptera) поймы Припяти под воздействием выпаса. Характер влияния выпаса на структуру комплексов саранчовых пойменных лугов Припяти прослежен на примере модельной группы Orthoptera. Полученные данные представлены в табл. 5.

Таблица 5

Структура комплексов Orthoptera естественных и выпасаемых пойменных лугов Припяти (экз./га, %)

Table 5

The structure of Orthopteran complexes in natural and grazing floodplain meadows of Pripyat (specimens/ha, %)

Вид	Биотопы			
	Естественные луга		Выпасаемые луга	
	относительная численность, экз./га	относительное обилие, %	относительная численность, экз./га	относительное обилие, %
<i>Conocephalus dorsalis</i>	383	6,2	–	–
<i>Conocephalus fuscus</i>	897	14,5	–	–
<i>Roeseliana raeseli</i>	–	–	247	5,2
<i>Tetrix bipunctata</i>	433	7,0	–	–
<i>T. subulata</i>	111	1,8	445	9,5
<i>T. tenuicornis</i>	309	5,0	–	–
<i>Chorthippus albomarginatus</i>	421	6,8	1369	29,1
<i>Ch. dorsatus</i>	303	4,9	445	9,5
<i>Ch. parallelus</i>	1014	16,4	411	8,7
<i>Glyptobothrus apricarius</i>	–	–	222	4,7
<i>Glyptobothrus brunneus</i>	–	–	198	4,2
<i>Omocestus viridulus</i>	563	9,1	793	16,9
<i>Aiollopus thalassinus</i>	19	0,3	–	–
<i>Stethophyma grossum</i>	1732	28,0	575	12,2
Всего	6185	100	4705	100

Как следует из данных табл. 5, на естественном пойменном лугу отмечен более разнообразный видовой состав прямокрылых за счет присутствия в группировке кузнечиков (Tettigoniidae) – индикаторов малонарушенных сообществ («заповедности»). Средняя относительная численность за сезон значительно выше, чем на выпасаемом лугу (6185 и 4705 экз./га соответственно), что объясняется разнообразием видовой состава растительного покрова и более высокой численностью представителей семейства Acrididae, являющихся гигрофильными стенобионтами – *Stethophyma grossum* и *Chorthippus parallelus*. На лугу, используемом под выпас, травостой ниже, беднее по флористическому составу, здесь больше инсолированных участков, что обусловило высокое относительное обилие (более чем в 4 раза выше по сравнению с естественным лугом) известного вредителя сельскохозяйственных угодий *Chorthippus albomarginatus* – 6,8 и 29,1 % соответственно.

Сравнительный анализ структуры населения прямокрылых естественной среды и направленность ее изменения в антропогенно измененных условиях наглядно продемонстрировал роль этих насекомых как

надежных индикаторов среды с присущими им биоиндикационными качествами, позволяющими определить экологический статус различных биотопов.

Саранчовые (Acrididae) являются одной из основных групп растительноядных животных в луговых экосистемах как естественных, так и трансформированных или созданных человеком. В умеренных широтах Евразии эти насекомые могут в течение теплого сезона потреблять свыше 10 % биомассы зеленых частей травяного покрова [32; 33]. В годы подъемов численности они способны уничтожать почти все надземные части травянистых растений. Саранча известна как один из самых древних вредителей сельского хозяйства, а вспышки ее массового размножения происходят на всех континентах планеты, за исключением Антарктиды. Многоядность, высокий репродуктивный потенциал и способность к перелетам на огромные расстояния обеспечили саранче статус самого опасного сельскохозяйственного вредителя на Земле.

На рис. 2 отражена качественная и количественная (численность) структура комплексов саранчовых в естественных и антропогенно трансформированных биоценозах.

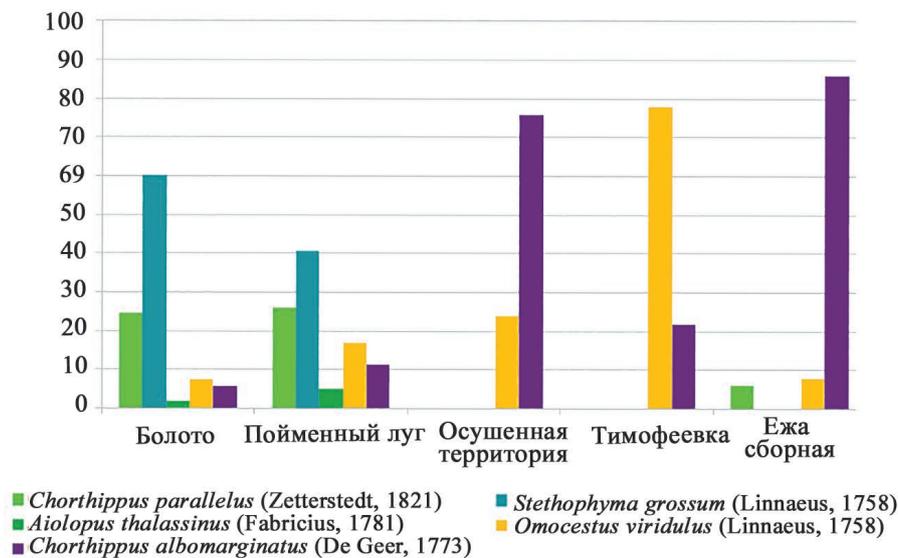


Рис. 2. Различия структуры комплексов саранчовых в биотопах малонарушенных и трансформированных биоценозов Белорусского Полесья

Fig. 2. The structure of locust complexes in biotopes of native and transformed biocenoses in Belarusian Polesie

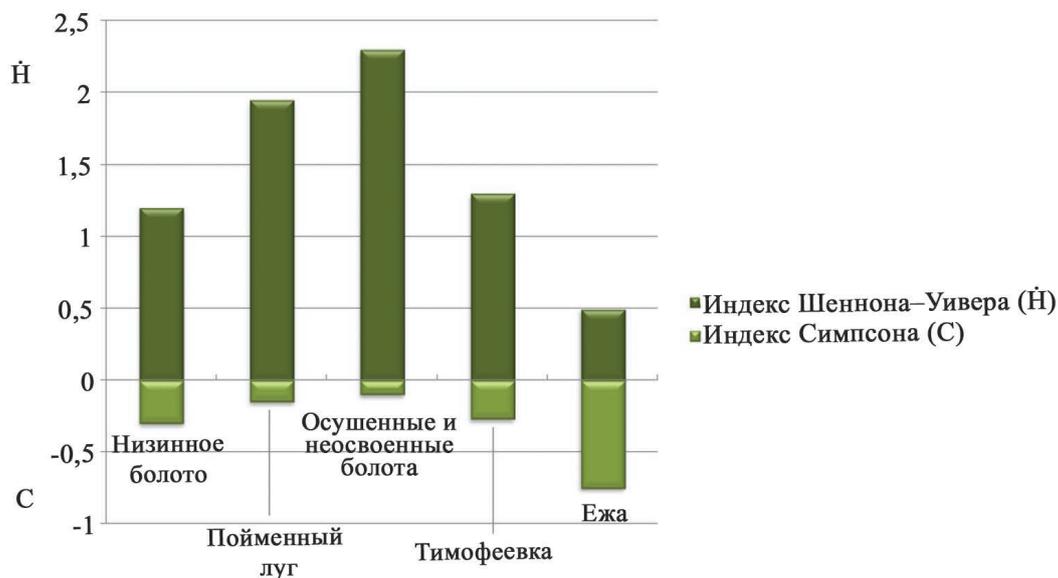


Рис. 3. Значения индексов Шеннона – Уивера (H') и Симпсона (C) для энтомокомплексов естественных и мелиорированных лугов разной степени освоения

Fig. 3. Shannon – Weaver (H') and Simpson (C) indices estimated for entomocomplexes in natural and reclaimed meadows of different degrees of transformation

В соответствии с данными рис. 2 можно констатировать, что процесс разрушения естественных биоценозов под влиянием глобальной осушительной мелиорации на территории Белорусского Полесья затрагивает структуру комплексов саранчовых и, в первую очередь, это касается видового состава, когда идет процесс замещения одних видов другими. Так, узкие гигрофильные стенобионты – кобылка болотная (*Stethophyma grossum*) и конек короткокрылый (*Chorthippus parallelus*) – практически полностью исчезают, а на осушенных землях и в агроценозах увеличивается численность мезофильных и ксерофильных видов и, что особенно важно, в агроценозах в доминанты выходят виды, нашедшие для себя оптимальные условия. На посевах же тимофеевки, где травостой высокий и густой, доминирует мезо-гигрофил – травянка зеленая (*Omocestus viridulus*), а на посевах ежи сборной со свойственным им невысоким изреженным травостоем – кобылка белополосая (*Chorthippus albomarginatus*), численность которой выше почти на порядок, что характеризует ее как потенциально опасный вид, способный многократно увеличивать численность. Скудность и однообразие видового состава саранчовых на монокультурах свидетельствует о нестабильности таких биоценозов, проявляющейся в массовости лишь одного-двух видов.

Тенденция изменения структуры доминирования в процессе трансформации биогеоценозов, вызванной осушительной мелиорацией и последующим преобразованием осушенных земель в агроценозы, отражена с помощью биоценологических показателей видового разнообразия (индекс Шеннона – Уивера) и доминирования (индекс Симпсона).

Исторически процесс замены первичных ландшафтов и слагающих их биоценозов вторичными – сельскохозяйственными – протекает в нарастающем темпе. Преобладающие на суше сельскохозяйственные ландшафты, возникшие по разным причинам и получившие термин агробиоценозов, являются следствием разрушения природного (или климаксового) биоценоза и возникновения на его месте нового, с иным сочетанием флористических и фаунистических компонентов, отражающих сукцессии аллогенного типа [33].

Выполненные исследования по изучению процессов, происходящих под влиянием осушительной мелиорации, позволили выявить антропогенно индуцированную динамику структуры сообществ прямокрылых естественных, а также трансформированных и вовлеченных в хозяйственный оборот земель. Было установлено, что в комплексах прямокрылых остается только один общий с гигрофитными биотопами вид – кобылка белополосая (*Chorthippus albomarginatus*), численность которой в некоторых агроценозах (на посевах ежи сборной) во много раз была выше, чем естественных, что отражено на рис. 4.

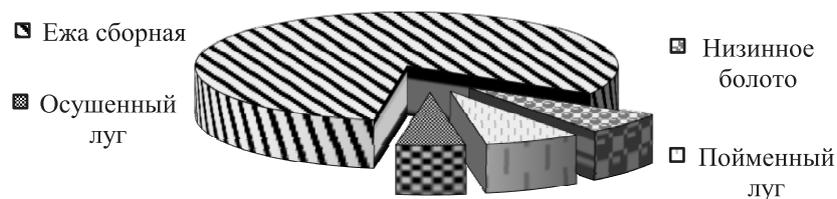


Рис. 4. Средняя за сезон численность (экз./га) кобылки белополосой (*Chorthippus albomarginatus* Deg.) в биотопах естественных и трансформированных биоценозов

Fig. 4. Average number (specimens/ha) of white-striped flycatcher (*Chorthippus albomarginatus* Deg.) in natural and transformed habitats (per season)

Как следует из рис. 4, относительное обилие этого вида, широко известного в качестве вредителя сельскохозяйственных культур умеренной климатической зоны Европы, а также Сибири [34; 35], сильно различается от местообитания к местообитанию: на болотах – около 5 %, более 6 на пойменных лугах, незначительно больше – 9, на осушенных неосвоенных участках, 8 – на посевах тимофеевки и почти 88 % – ежи сборной. Бесспорно, что этот вид наряду с другими прямокрылыми пригоден для биоиндикационной оценки.

Наряду с важной проблемой в современном сельском хозяйстве – плодородием почв – огромное значение придается изучению состояния и динамики сообществ хозяйственно-важных видов насекомых, включая и вредителей, которые могут в агроценозах привести в агроценозах к значительным экономическим потерям.

Изучение трофической структуры комплексов саранчовых-фитофагов позволяет оценить функционирование любого биогеоценоза, в том числе и агробиоценоза, и может быть использовано для мониторинга и составления прогноза ожидаемой вредоносности отдельных видов. Важнейшим же количественным параметром трофической структуры сообществ любых организмов, в том числе и саранчовых, является биомасса, позволяющая установить степень воздействия или давления на биоценоз насекомых-фитофагов.

Соотношение биомассы трех модельных видов-фитофагов – конька лугового (*Chorthippus dorsatus*), конька бурого (*Glyptobothrus apricarius*) и травянки зеленой (*Omocestus viridulus*) в местах их обитания представлены на рис. 5, 6 и 7. Сравниваются показатели биомассы этих видов на пойменных и осушенных лугах, выпасах и в агроценозах (посевы тимофеевки).

Как следует из рис. 5, наибольшая биомасса травянки зеленой – мезофильного вида – характерна для пойменного луга, а наименьшая – для монокультуры (поля тимфеевки). Осушенный луг и выпас в практически одинаковых экологических условиях, имеют и близкие значения этого показателя.

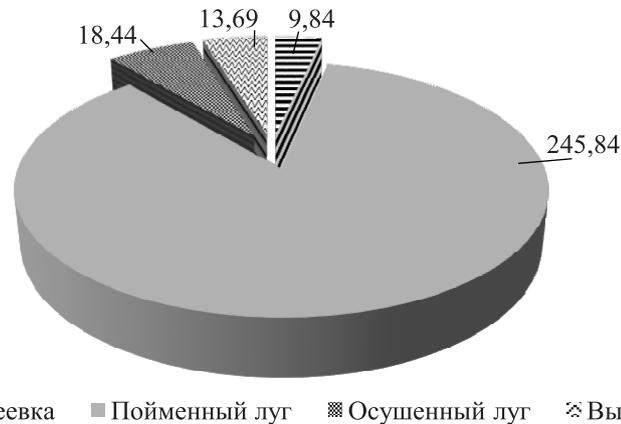


Рис. 5. Биомасса (г/га) *Omocestus viridulus* в разных биотопах поймы Припяти

Fig. 5. Biomass (g/ha) of *Omocestus viridulus* in different habitats at the Pripyat floodplain

Конек луговой (*Chorthippus dorsatus*) встречается на естественных пойменных лугах с умеренной влажностью и мезофитной растительностью, а также в техногенно-трансформированных биотопах: на осушенном лугу и выпасе, где условия характеризуются произрастанием ксерофитных растений и сухостью почв (рис. 6).

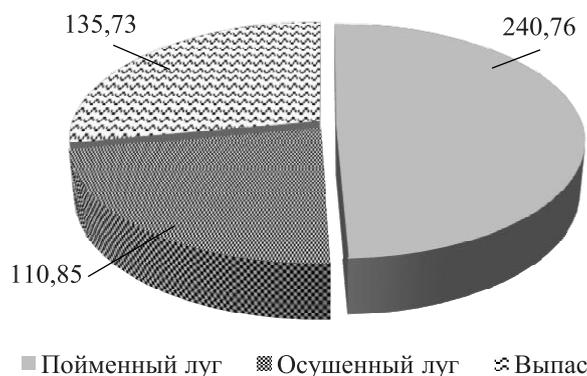


Рис. 6. Биомасса (г/га) *Chorthippus dorsatus* в разных биотопах поймы Припяти

Fig. 6. Biomass (g/ha) of *Chorthippus dorsatus* in different habitats at the Pripyat floodplain

Как следует из рис. 7, наибольшая биомасса этого вида зарегистрирована для пойменного луга, тогда как для осушенного луга и выпаса она примерно вдвое ниже.

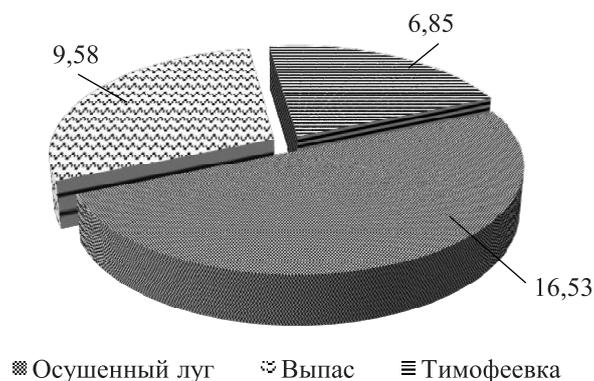


Рис. 7. Биомасса (г/га) *Glyptobothrus apricarius* в разных биотопах поймы Припяти

Fig. 7. Biomass (g/ha) of *Glyptobothrus apricarius* in different habitats at the Pripyat floodplain

Конек бурый (*Glyptobothrus apricarius*) встречался в трансформированных биотопах: наиболее высокой (чуть более половины) численность этого вида была на осушенном лугу и тимофеевке, что характеризует его как ксерофильный вид.

На рис. 7 показано распределение биомассы и численные ее значения для конька бурого в местах его обитания. Так, наибольшее ее значение (16,5 г/га) регистрировалось на осушенном лугу, на посевах тимофеевки и выпасе она составила 6,9 и 9,6 г/га соответственно.

Анализ полученных результатов позволил установить характерные черты структуры сообществ саранчовых – обитателей естественных (гигрофитных) и преобразованных (ксерофитных) местообитаний, а также видов индикаторов состояния среды и видов, имеющих важное хозяйственное значение.

Заключение

В результате многолетнего изучения путей преобразования энтомокомплексов открытых биотопов Белорусского Полесья, обусловленных разрушением и трансформацией естественных биоценозов в результате осушительной мелиорации, дана целостная картина этого процесса.

Получены информативные критерии, отражающие особенности формирования структуры энтомокомплексов открытых биоценозов этого региона Беларуси в постмелиоративных условиях и причины структурных перестроек, что представляет интерес в связи с проблемой нарастающего процесса опустынивания и деградации земель, затрагивающего все континенты.

Установлено, что население энтомокомплексов естественных лугов и антропогенно измененных участков в пойме Припяти представлено 9-ю отрядами насекомых (Insecta).

Выявлена тенденция изменения структурно-функциональной организации энтомокомплексов, проявляющаяся в смене компонентов, различающихся гигропреферентумом и адаптационными возможностями.

Показано, что антропогенно-индуцированное изменение динамики качественной и количественной структуры сообществ, а также экологических комплексов проявляется в замещении гигрофильных стенобионтов мезофильными и мезо-ксерофильными видами и даже элементами степной (*Stenobothrus lineatus*), полупустынной (*Gomphocerippus rufus*) и даже пустынной фауны (*Bryodemella tuberculata*). Появление этих чужеродных видов объяснимо снятием барьера, каковым ранее являлись низинные болота, а также представляет потенциальную опасность массового размножения некоторых видов.

Установлено, что с возрастанием антропогенной нагрузки на биогеоценозы в виде дальнейшего использования под монокультуры наблюдается практически полное изменение условий среды и в обеднении их видового состава энтомокомплексов, с одной стороны, а с другой – многократным увеличением численности одного-двух видов, для которых создавшиеся условия оказались оптимальными. Так, в агроценозах зарегистрирована высокая численность *Chorthippus albomarginatus*. Наблюдается уменьшение разнообразия хортобионтов и увеличение – геофилов, а также уменьшение или полное исчезновение видов-индикаторов заповедности, которыми являются некоторые кузнечики (Tettigoniidae).

Анализ данных подтверждает биоиндикационную значимость отдельных отрядов насекомых и некоторых представителей отряда Orthoptera, что может быть использовано для мониторинга состояния среды.

Библиографические ссылки

1. Рассашко ИФ, Ковалева ОВ, Крук АВ. *Общая экология. Тексты лекций для студентов специальности 1-33 01 02 «Геоэкология»*. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины; 2009. 228 с.
2. Киселев ВМ, Киселёва ЕВ, Колтун ЛВ, Яротов АЕ. Квазивековая флуктуация климата Белорусского Полесья. В: *Научные и прикладные аспекты изменения климата и использования климатических ресурсов. Тезисы докладов Международной научной конференции, Минск, 31 октября – 3 ноября, БГУ*. Минск: [б. и.]; 2000. с. 56–58.
3. Кочановский СБ. Международная республиканская конференция «Европа – наш общий дом: Экологические аспекты». *Белорусский экономический журнал*. 2000;1:135–138.
4. Природные ресурсы Полесья: оценка, использование, охрана. В: *Материалы Международной научно-практической конференции, Пинск, 8–11 июня 2015 г. В 2-х частях*. Пинск: [б. и.]; 2015. 213 с.
5. Сушко ГГ, Шкатуло ВВ. Современное состояние и основные тенденции изменений комплексов насекомых (Insecta, Auchenorrhyncha, Heteroptera, Coleoptera) трансформированных верховых болот Белорусского Поозерья. *Вестник ВГУ*. 2014;4:82.
6. Федоренко АВ. Видовой состав пойменного луга реки Припять. Состояние природной среды Полесья и сопредельных территорий. В: *Материалы Республиканской научно-практической конференции студентов, магистрантов и аспирантов (Брест, 25 марта 2011 г.)*. Брест: БрГУ им. А. С. Пушкина; 2011. с. 53–55.
7. Хотько ЭИ. Полезные беспозвоночные различных биогеоценозов заповедников и заказников Белоруссии. В: *Труды ВЭО*. Ленинград: ЗИН АН СССР; 1986. Том 68. с. 37–40.
8. Хотько ЭИ. *Почвенная фауна Беларуси*. Минск: Наука и техника. 1993. 252 с.
9. Яновская ВВ. Эколого-фаунистическая характеристика энтомокомплексов (Insecta: Auchenorrhyncha, Heteroptera, Coleoptera) антропогенно трансформированных верховых болот Белорусского Поозерья [автореферат диссертации]. Витебск: [б. и.]; 2016. 23 с.

10. Літвінова АМ Уплыў асушальнай меліярацыі на структуру насельнікаў беспазваночных жывёл ў кронах лясных біягеацэнозаў Беларускага Полесься. *Весці АН БССР. Сeryя біялагічных навук*. 1977;6:84–96.
11. Трухан МН. *Фенология и сезонная численность мокрецов на мелиорированной территории Белорусского Полесья*. Минск: [б. и.]; 1979. с. 192–199.
12. Лаврова НК, Бирг АВ, Жабинская МИ. Изменение фауны двукрылых (Diptera), вызываемые осушительной мелиорацией в Белорусском Полесье. В: *Влияние хозяйственной деятельности человека на беспозвоночных*. Минск: Наука и техника; 1980. с. 54–60.
13. Золотарев ДА. *Хортобионтные полужесткокрылые (Insecta: Hemiptera=Heteroptera) антропогенно трансформированных территорий (на примере г. Кемерово)* [автореферат диссертации]. Томск: [б. и.]; 2005. 20 с.
14. Семенов ВБ, Гильденков МЮ, Стародубцева ОА, Семионенков ОИ. *Жесткокрылые насекомые (Insecta: Coleoptera) Национального парка «Смоленское Поозерье»*. Смоленск: Маджента; 2012. 192 с.
15. Хотько ЭИ. Изменение фауны почвообитающих личинок двукрылых (Diptera) низинных болот под влиянием мелиорации и сельскохозяйственного освоения. *Экология*. 1978;1:70–75.
16. Хотько ЭИ, Панкевич ТП, Молчанова РВ. *Влияние осушения и последующего сельскохозяйственного освоения болот на структуру жуужелиц (Coleoptera, Carabidae). Влияние хозяйственной деятельности человека на беспозвоночных*. Минск: Наука и техника; 1980. с. 158–180.
17. Літвінова АН, Смірнова ТП, Анфінагенава ВГ, Бяляўская ВІ, Шхляхцёнак АС, Максіменкаў МВ. Змяненне энтамафауны пераўвільгатненых зямель басейна Ясельды ў сувязі з іх меліярацыяй. *Весці АН БССР. Сeryя біялагічных навук*. 1986;6:93–98.
18. Смирнова ТП, Анфиногенова ВГ, Белявская ВИ. Сравнительная оценка энтомофауны луговых биоценозов поймы р. Припять. В: *Биологическое разнообразие национального парка «Припятский»*. Туров-Мозырь: Белый ветер; 1999. с. 185–188.
19. Александрович ОР, Лопатин ИК, Писаненко АД, Цинкевич ВА, Снитко СМ. *Каталог жесткокрылых (Coleoptera, Insecta) Беларуси*. Минск: ФФИ; 1996. 103 с.
20. Рыковский ГФ, Бернякович ИВ, Голденков АА. *Биологическое разнообразие верховых болот Беларуси*. Программа ООН по окружающей среде. Минск: [б. и.]; 2003. 16 с.
21. Сушко ГГ. *Фауна и экология жесткокрылых (Ectognatha, Coleoptera) верховых болот Белорусского Поозерья. Монография*. Витебск: [б. и.]; 2006. 247 с.
22. Ковалев АВ. *Жесткокрылые семейств Throscidae, Eucnemidae, Cerophytidae и Brachypsectridae (Coleoptera) фауны России и сопредельных стран* [диссертация]. Санкт-Петербург: [б. и.]; 2014. 234 с.
23. Шкатуло ВВ, Лукашук АО. Полужесткокрылые (Insecta: Heteroptera) верховых болот Белорусского Поозерья после осушительной мелиорации. *Весці НАН Беларусі. Сeryя біялагічных навук*. 2014;1:107–116.
24. Лукашук АО. *Фауна полужесткокрылых трансформированных земель*. Минск: Беларуская навука; 2014. 128 с.
25. Сергеева ТП, Строженко СЮ. Биотопическое распределение и динамика структуры сообществ саранчовых (Acrididae) естественных и техногенно трансформированных биогеоценозов Белорусского Полесья. Современные проблемы энтомологии Восточной Европы. В: *Материалы 1 Международной научно-практической конференции. Минск, 8–10 сентября 2015 г.* Минск: Экоперспектива; 249–252.
26. Сергеева ТП, Смирнова ЕГ, Казанцева ВИ. Индикационная роль саранчовых (Insecta: Acrididae) осушенных земель белорусского Полесья. *Экологический вестник*. 2016;2(24):122–127.
27. Смирнова ТП. Изменение сообществ прямокрылых Белоруссии при антропогенном воздействии. *Сибирский экологический журнал*. 2006;3:287–289.
28. Хомич ВС и др. *Природные ресурсы Полесья: оценка, использование, охрана*. Пинск: ПолесГУ; 2015. 179 с.
29. Фасулати КК. *Полевое изучение наземных беспозвоночных*. Москва: Высшая школа; 1971. 304 с.
30. Палий ВФ, Гайваронская ИК. *Испытание различных типов сачков для сбора насекомых. Сборник энтомологических работ*. Москва: [б. и.]; 1963. с. 92–99.
31. Копанева ЛМ. *Прямокрылые (Orthoptera) и степень антропогенного пресса в агроценозах*. Ленинград: ВИЗР; 1987. с. 25–38.
32. Чернов ЮИ. *Основные синэкологические характеристики почвенных беспозвоночных и методы их анализа. Методы исследований почвенных беспозвоночных*. Москва: Наука; 1975. с. 160–216.
33. Копанева ЛМ. Особенности распределения саранчовых в агроландшафтах Казахстана и Киргизии на макропрофиле от Чу-Балхашской впадины до Внутреннего Тянь-Шаня. *Труды энтомологического общества*. 1986;68:156–158.
34. Сергеев МГ. Закономерности распределения насекомых-фитофагов в травянистых экосистемах Голарктики. *Известия АН. Серия биология*. 1998;4:445–450.
35. Пшеницына ЛБ. Уровень поглощения и утилизации фитомассы степными саранчовыми. *Сибирский экологический журнал*. 1997;3:263–268.

References

1. Rassashko IF, Kovaleva OV, Kruk AV. *Obshchaya ekologiya. Teksty lektsiy dlya studentov spetsial'nosti 1-33 01 02 «Geoekologiya»* [General ecology]. Gomel: GGU im. F. Skoriny; 2009. Russian.
2. Kiselev VM *Kvazivekovaya fluktuatsiya klimata Belorusskogo Poles'ya* [Quasi-secular climate fluctuations in Belarusian Polissya]. In: *Nauchnyye i prakticheskiye aspekty izmeneniya klimata i ispol'zuyemykh klimaticheskikh resursov. Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Минск: [publisher unknown]; 2000. p. 56–58. Russian.
3. Kochanovskiy SB. *Mezhdunarodnaya respublikanskaya konferentsiya «Yevropa – nash obshchiy dom: Ekologicheskkiye aspekty»* [International Republican Conference «Europe – Our Common Home: Environmental Aspects»]. *Belorusskiy ekonomicheskii zhurnal*. 2000;1:135–138. Russian.
4. *Prirodnye resursy Poles'ya: ochenka, ispolzovanie, ohrana* [Natural resources of Polissya: assessment, use, protection]. In: *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Pinsk 2015, June 8–11. V 2 chastiakh*. Pinsk: [publisher unknown]; 2015. 213 p. Russian.
5. Sushko GG, Shkatulo VV. *Sovremennoe sostoyanie i osnovnye tendentsii izmenenij kompleksov nasekomykh (Insecta, Auchenorrhyncha, Heteroptera, Coleoptera) transformirovannykh verhovyykh bolot Belorusskogo Poozer'ya* [The current state and main

- trends in the changes of insect complexes (Insecta, Auchenorrhyncha, Heteroptera, Coleoptera) of transformed raised bogs of the Belarusian Lakeland]. *Vestnik VGU*. 2014;4:82. Russian.
6. Fedorenko AV. *Vidovoj sostav pojmnogo luga reki Pripyat* [Species composition of the floodplain meadow of the Pripyat River]. In: *Sostoyanie prirodnoj sredy Poles'ya i sopredel'nyh territorij. Materialy Respublikanskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, magistrantov i aspirantov (Brest, 2011, March 25)*. Brest: BrGU im. A. S. Pushkina; 2011. p. 53–55. Russian.
 7. Hot'ko EI. *Poleznye bespozvonochnye razlichnyh biogeocenzov zapovednikov i zakaznikov Belorussii* [Useful invertebrates of various biogeocenoses of reserves and sanctuaries in Belarus]. *Trudy VEO*. Leningrad: ZIN AN SSSR; 1986. Part 68. p. 37–40. Russian.
 8. Hot'ko EI. *Pochvennaya fauna Belarusi* [Soil fauna of Belarus]. Minsk: Navuka i tekhnika; 1993. 252 p. Russian.
 9. Yanovskaya VV. *Ekologo-faunisticheskaya charakteristika entomokompleksov (Insecta: Auchenorrhyncha, Heteroptera, Coleoptera) antropogenno transformirovannykh verkhovykh bolot Belorusskogo Poozer'ya* [Ecological and faunistic characteristics of entomocomplexes (Insecta: Auchenorrhyncha, Heteroptera, Coleoptera) of anthropogenically transformed raised bogs of the Belarusian Poozerie] [PhD thesis]. Vitebsk: [publisher unknown]; 2016. 23 p. Russian.
 10. Litvinova AM. *Uplyy asushal'naj meliyaracyi na strukturu nasekomykh bespozvonochnykh zhyvel u kronah lyasnykh biogeocenzov Belorusskogo Poles'ya* [Drift dry land reclamation on the structure of the occupants of the bessidaceous living creatures in the crowns of the forest biogeocenosis of Belorussian Polesie]. *Vesci AN BSSR. Seryia biyalagichnykh navuk*. 1977;6:84–96. Belarusian.
 11. Truhan MN. *Fenologiya i sezonnaya chislennost' mokrcev na meliorirovannoj territorii Belorusskogo Poles'ya* [Phenology and seasonal abundance of biting midges in the reclaimed territory of Belarusian Polesia]. Minsk: [publisher unknown]; 1979. p. 192–199.
 12. Lavrova NK, Birg AV, Zhabinskaya MI. *Izmenenie fauny dvukrylykh (Diptera), vyzvaemye osushitel'noj melioraciej v Belorusskom Poles'e* [Changes in the Diptera fauna caused by drainage reclamation in Belarusian Polissya]. In: *Vliyaniye khozyaystvennoy deyatel'nosti cheloveka na bespozvonochnykh*. Minsk: Nauka i tekhnika; 1980. p. 54–60. Russian.
 13. Zolotarev DA. *Hortobiontnye poluzhestkokrylye (Insecta: Hemiptera=Heteroptera) antropogenno transformirovannykh territorij (na primere g. Kemerovo)* [Hortobiont Hemiptera (Insecta: Hemiptera=Heteroptera) of Anthropogenically Transformed Territories (on the example of the city of Kemerovo)] [PhD thesis]. Tomsk: [publisher unknown]; 2005. 20 p. Russian.
 14. Semenov VB, Gildenkov MYu, Starodubceva OA, Semionenko OI. *Zhestkokrylye nasekomye (Insecta: Coleoptera) Nacional'nogo parka «Smolenskoe Poozerie»* [Coleoptera insects (Insecta: Coleoptera) of the Smolenskoye Poozerie National Park]. Smolensk: Madzhenta; 2012. 192 p. Russian.
 15. Hotko EI. *Izmenenie fauny pochvoobitayushchih lichinok dvukrylykh (Diptera) nizinykh bolot pod vliyaniem melioracii i selskohozyajstvennogo osvoeniya* [Changes in the fauna of soil-dwelling Diptera larvae of lowland bogs under the influence of land reclamation and agricultural development]. *Ekologiya*. 1978;1:70–75. Russian.
 16. Hotko EI, Pankevich TP, Molchanova RV. *Vliyaniye osusheniya i posleduyushchego sel'skohozyajstvennogo osvoeniya bolot na strukturu zhuzhelic (Coloptera, Carabidae)* [Influence of drainage and subsequent agricultural development of swamps on the structure of ground beetles (Coloptera, Carabidae)]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1980. p. 158–180. Russian.
 17. Smirnova TP, Litvinova AN, Anfinogenova VG, Belyavskaya VI. *Zmianenne entamofauny perajvil'gatnykh zyamel' baseina Yasel'dy u svyazi z ikh meliyaratsyyai* [Changes in the entomofauna of waterlogged lands in the basin of the river Yaseldy in connection with their melioration]. *Vesci AN BSSR. Seryia biyalagichnykh navuk*. 1986;6:93–98. Belarusian.
 18. Smirnova TP, Anfinogenova VG, Belyavskaya VI. *Sravnitel'naya ocenka entomofauny lugovykh biocenzov pojmy r. Pripyat'* [Comparative assessment of the entomofauna of meadow biocenoses of the floodplain of the river Pripyat]. In: *Biologicheskoe raznoobrazie nacional'nogo parka «Pripiyatskij»*. Turov – Mozyr: Belyi veter; 1999. p. 185–188. Russian.
 19. Aleksandrovich OR, Lopatin IK, Pisanenko AD, Cinkevich VA, Snitko S M. *Katalog zhestkokrylykh (Coleoptera, Insecta) Belarusi* [Catalog of beetles (Coleoptera, Insecta) of Belarus]. Minsk: FFI; 1996. 103 p. Russian.
 20. Rykovskij GF, Beryakovich IV, Goldenkov AA. *Biologicheskoe raznoobrazie verkhovykh bolot Belarusi* [Biological diversity of raised bogs in Belarus]. Minsk: [publisher unknown]; 2003. 16 p. Russian.
 21. Sushko GG. *Fauna i ekologiya zhestkokrylykh (Ectognatha, Coleoptera) verkhovykh bolot Belorusskogo Poozer'ya* [Fauna and ecology of Coleoptera (Ectognatha, Coleoptera) in raised bogs of the Belarusian Lakeland]. Monografiya. Vitebsk: Vitebskij gosudarstvennyj universitet imeni P. M. Masherova; 2006. 247 p. Russian.
 22. Kovalev AV. *Zhestkokrylye semejstv Throscidae, Eucnemidae, Cerophytidae i Brachypsectridae (Coleoptera) fauny Rossii i sopredel'nykh stran* [Coleoptera of the families Throscidae, Eucnemidae, Cerophytidae and Brachypsectridae (Coleoptera) of the fauna of Russia and neighboring countries][dissertation]. Saint Peterburg: [publisher unknown]; 2014. 234 p. Russian.
 23. Shkatulo VV, Lukashuk AO. *Poluzhestkokrylye (Insecta: Heteroptera) verkhovykh bolot Belorusskogo Poozer'ya posle osushitel'noj melioracii* [Hemiptera (Insect: Neteroptera) of raised bogs of the Belarusian Poozerie after drainage reclamation]. *Vesci NAN Belarusi. Seryia biyalagichnykh navuk*. 2014;1:107–116. Russian.
 24. Lukashuk AO. *Fauna poluzhestkokrylykh transformirovannykh zemel'* [Fauna of Hemiptera transformed lands]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2014. 128 p. Russian.
 25. Sergeeva TP, Storozhenko SYu. *Biotopicheskoe raspredelenie i dinamika struktury soobshchestv saranchovykh (Acrididae) estestvennykh i tekhnogenno transformirovannykh biogeocenzov Belorusskogo Poles'ya* [Biotopic distribution and structure dynamics of locust (Acrididae) communities of natural and technogenically transformed biogeocenoses of Belarusian Polissya]. In: *Sovremennye problemy entomologii Vostochnoj Evropy. Materialy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Minsk, 2015 sentyabrya 8–10*. Minsk: Ekoprospektiva; p. 249–252. Russian.
 26. Sergeeva TP, Smirnova EG, Kazanceva VI. *Indikacionnaya rol' saranchovykh (Insecta: Acrididae) osushennykh zemel' belorusskogo Poles'ya* [Indicative role of locust (Insecta: Acrididae) drained lands of the Belarusian Polissya]. *Ekologicheskij vestnik*. 2016;2(24):122–127. Russian.
 27. Smirnova TP. *Izmenenie soobshchestv pryamokrylykh Belorussii pri antropogenom vozdeystvii* [Changes in Orthoptera communities in Belarus under anthropogenic impact]. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2006;3:287–289. Russian.
 28. Homich VS, et al. *Prirodnye resursy Poles'ya: ocenka, ispol'zovanie, ohrana* [Natural resources of Polissya: assessment, use, protection: Polesky state]. Pinsk: PolesGU; 2015. 179 p. Russian.

29. Fasulati KK. *Polevoe izuchenie nazemnykh bespozvonochnykh* [Field study of terrestrial invertebrates]. Moscow: Vysshaya shkola; 1971. 304 p. Russian.
30. Palij VF, Gajvaronskaya IK. *Razrabotka metodiki kosheniya sachkom – kak sposob ucheta melkih vidov entomofauny travostoya. Sbornik entomologicheskikh rabot* [Development of a mowing technique with a net – as a way to account for small species of grass stand entomofauna]. Moscow: [publisher unknown]; 1963. p. 92–99. Russian.
31. Kopaneva LM. *Pryamokrylye (Orthoptera i stepen' antropogennoy pressy v agrocenozah* [Orthoptera and the degree of anthropogenic pressure in agrocenoses]. Leningrad: VIZR; 1987. p. 25–38. Russian.
32. Chernov YuI. *Osnovnye synecologicheskiye kharakteristiki pochvennykh bespozvonochnykh i metody ikh analiza* [Basic synecological characteristics of soil invertebrates and methods for their analysis. Methods for studying soil invertebrates]. Moscow: Nauka; 1975. p. 160–216. Russian.
33. Kopaneva LM. *Osobennosti raspredeleniya saranchovykh v agrolandshaftah Kazahstana i Kirgizii na makroprofile ot Chu-Balhashskoy vpadiny do Vnutrennego Tyan'-Shanya* [Peculiarities of distribution of locusts in the agrolandscapes of Kazakhstan and Kyrgyzstan on the macroprofile from the Chu-Balkhash depression to the Inner Tien Shan]. *Trudy entomologicheskogo obshchestva*. 1986;68:156–158. Russian.
34. Sergeev MG. *Zakonomernosti raspredeleniya nasekomykh-fitofagov v travyanistyykh ekosistemah Golarktiki* [Patterns of distribution of phytophagous insects in herbaceous ecosystems of the Holarctic]. *Izvestia AN. Seriya biologiya*. 1998;4:445–450. Russian.
35. Pshenicyna LB. *Uroven pogloshcheniya i utilizatsii fitomassy stepnymi saranchovymi* [The level of absorption and utilization of phytomass by steppe locusts]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*. 1997;3:263–268. Russian.

Статья поступила в редакцию 07.08.2022.
Received by editorial board 07.08.2022.

УДК 539.16.04:630*164.4(630*176.322.6)

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ И КОРЫ ДУБА ^{137}Cs В ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

А. В. УГЛЯНЕЦ¹⁾, Д. К. ГАРБАРУК¹⁾

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

Приведены результаты изучения радиоактивного загрязнения ^{137}Cs стволов дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в высоковозрастных дубравах на наиболее загрязненной части территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, расположенного в зоне эвакуации (отчуждения) Чернобыльской атомной электростанции. Установлены особенности современного поверхностного загрязнения почвы ^{137}Cs в лесных насаждениях дуба, выявлены обуславливающие их факторы: удаление объектов исследования от места выброса и условия осадения радиоактивных выпадений, а также вертикальное перераспределение радионуклида в почве за прошедшее после аварии время. Плотность загрязнения почв ^{137}Cs различается по типам леса дубрав. Определены современные показатели накопления ^{137}Cs в древесине, коре и неокоренных стволах дуба, их изменения по типам леса, связь с плотностью загрязнения почвы и расстоянием до места катастрофы. Установлено 2–3-кратное превышение загрязнения коры дуба ^{137}Cs в сравнении с древесиной, которое обусловлено их морфо-физиологическими особенностями. За последние 25 лет существенно изменились пропорции относительных вкладов древесины и коры в удельную активность ^{137}Cs ствола дуба. По причине замедления поступления радионуклида в кору, ее вклад в удельную активность ^{137}Cs в стволе значительно снизился. Показано распределение радионуклида в древесине дуба по классам роста и развития деревьев (по Крафту) и валежнике. Установлено, что средние значения удельной активности ^{137}Cs в сухостое и валежнике на 25–28 % ниже, чем в древесине живых деревьев. Подтверждена тенденция снижения концентрации радионуклида в древесине от периферии к центру ствола. По состоянию на 2021 г. при санитарном нормативе Республики Беларусь по содержанию ^{137}Cs в 1480 Бк/кг заготовка окоренной древесины дуба была допустима в 84 % обследованных древостоев, неокоренная – 72 %. Нормативу 740 Бк/кг соответствовала окоренная и неокоренная древесина в 32 % насаждений дуба.

Ключевые слова: Чернобыльская атомная электростанция; зона отчуждения; дуб черешчатый (*Quercus robur* L.); древесина; кора; ^{137}Cs ; удельная активность; коэффициент перехода.

ASSESSMENT OF OAK WOOD AND BARK CONTAMINATION BY ^{137}Cs IN THE EXCLUSION ZONE OF THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT

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

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

The results of studying the ^{137}Cs contamination of English oak (*Quercus robur* L.) trunks in high-aged oak forests in the most radioactive polluted part of the Polesye State Radiation-Ecological Reserve territory located in the evacuation

Образец цитирования:

Углынец АВ, Гарбарук ДК. Оценка загрязнения древесины и коры дуба ^{137}Cs в зоне отчуждения Чернобыльской атомной электростанции. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;4:33–45.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-33-45>

For citation:

Uglyanets AV, Garbaruk DK. Assessment of oak wood and bark contamination by ^{137}Cs in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;4:33–45. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-33-45>

Авторы:

Анатолій Владимирович Углынец – кандидат сельскохозяйственных наук; ведущий научный сотрудник отдела экологии растительных комплексов.
Дмитрий Константинович Гарбарук – заведующий отделом экологии растительных комплексов.

Authors:

Anatoliy V. Uglyanets, PhD (agriculture); leading researcher of the department of ecology of vegetative complexes.
uhlianets@mail.ru
Dmitriy K. Garbaruk, head of the department of ecology of vegetative complexes.
dima.garbaruk.77@mail.ru

(exclusion) zone of the Chernobyl nuclear power plant are presented. The features of modern surface contamination soil by ^{137}Cs in oak forest stands have been established, the factors that caused them have been identified: removal of research objects from the release site and conditions for deposition of radioactive fallout, as well as vertical redistribution of radionuclide in the soil over the time since the accident. The density of ^{137}Cs soil contamination varies by types of oak forest. The current indicators of ^{137}Cs accumulation in wood, bark and oak trunks, their changes by forest types, the relationship with the density of soil pollution and the distance to the disaster site are determined. A 2–3-fold excess of ^{137}Cs oak bark contamination was found in comparison with wood, which is due to their morpho-physiological characteristics. Over the past 25 years, the wood and bark proportions of the relative contributions to the specific activity of ^{137}Cs of the oak trunks have changed significantly. The decrease in the contribution of the bark to the specific activity of ^{137}Cs in the trunk is due to a slowdown in the entry of radionuclide into it. The ^{137}Cs distribution in oak wood by classes of growth and development of trees by Craft is shown. It was found that the average values of the radionuclide specific activity in standing and lying deadwood are 25–28 % lower than in the wood of living trees. The tendency of decreasing of ^{137}Cs concentration in oak wood from the periphery to the center of the trunk has been confirmed. As of 2021, according to the sanitary standard of the Republic of Belarus for the content of ^{137}Cs 1480 Bq kg⁻¹, harvesting of oak wood could be allowed in 84 % of the surveyed stands, oak trunks with bark – in 72 %. The standard of 740 Bq kg⁻¹ corresponded to oak wood in bark and without bark in 32 % of forest stands.

Keywords: Chernobyl Nuclear Power Plant; exclusion zone; oak (*Quercus robur* L.); wood; bark; ^{137}Cs ; specific activity; transition coefficient.

Введение

Преодоление последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) является целью реабилитации радиоактивно загрязненных территорий и вовлечение в хозяйственный оборот находящихся на них природных ресурсов, включая древесные. В зоне отчуждения (ЗО) ЧАЭС, в белорусском секторе, где расположен Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (заповедник), радиационная обстановка очень напряженная [1; 2]. На части его территории площадью 149 тыс. га (68,7 % от общей площади заповедника) с уровнями плотности загрязнения почвы (ПЗ) ^{137}Cs выше 40 Ки/км² (1480 кБк/м²) заготовка древесины не осуществлялась с момента аварии. За 35 лет леса накопили значительные объемы древесины. Часть их, достигнув климаксовой стадии, начала деградировать.

Мозаичность выпадения радиоактивных веществ обеспечила значительные различия в загрязнении территории ЗО ЧАЭС [1]. С момента их осадения протекают процессы накопления и перераспределения радионуклидов между элементами биогеоценозов, а также очищения от них структурных частей деревьев. Из расчета 30-летнего эффективного периода полуснижения ^{137}Cs в древесине лиственных пород [3; 4] его активность в древесине дуба к настоящему времени должна сократиться более чем наполовину. В 2000-х гг. на участках заповедника с ПЗ ^{137}Cs 15–40 Ки/км² удельная активность (A_y) ^{137}Cs в ней составляла в среднем 855 Бк/кг, а ее очищение до нормативного уровня в 740 Бк/кг прогнозировалось к 2039 г. [5]. По более поздним данным [6], расчетное время снижения A_y ^{137}Cs в окоренной древесине дуба до этого уровня при ПЗ ^{137}Cs 6,6–17,5 Ки/км² определено 2021–2040 гг.

Дубравы в заповеднике, согласно материалам лесоустроительного проекта на 2021–2030 гг., занимают 7863 га (5,6 % лесопокрытой площади) с запасом древесины 1,26 млн м³. На территории, ограниченной изолинией ПЗ ^{137}Cs выше 40 Ки/км², находится 62,6 % площади дубовой формации и 60,3 % запаса ее древесины. При этом на спелые, перестойные и приспевающие насаждения приходится 23,3 % площади дубрав и 32,9 % (0,25 млн м³) их запаса.

В восточной части Белорусского Полесья дубравы подвержены деградации [7], которая в заповеднике усиливается высоким возрастом древостоев и отсутствием лесоводственных уходов [8]. В итоге теряется ценная древесина. Актуальным вопросом является возможность ее заготовки.

Из основных лесобразующих пород ЗО ЧАЭС накопление ^{137}Cs стволами деревьев дуба и их структурными частями (древесиной и корой) наименее изучено. Установлено [9; 10], что содержание радионуклида в них выше, чем у сосны и ели, но ниже, чем у осины, березы, ольхи черной. Древесина дуба, как правило, менее интенсивно аккумулирует ^{137}Cs в сравнении с древесиной других пород [11–13]. Но на влажных почвах по показателям загрязнения она превосходит сосну и мелколиственные породы [14]. В разных типах лесорастительных условий (ТЛУ) по величине коэффициента перехода (K_n) ^{137}Cs в древесину дуб может располагаться в любой части ранжированных рядов [12]. Его кора накапливает ^{137}Cs намного интенсивнее древесины [4; 6; 14; 15]. Приведенный анализ указывает на актуальность оценки содержания ^{137}Cs в древесине и коре дуба на территории с высокой ПЗ этим радионуклидом на современном этапе последствий радиационной катастрофы.

Цель исследования – оценить современные уровни загрязнения ^{137}Cs древесины, коры и неокоренных стволов дуба на части территории ЗО ЧАЭС с высокими уровнями загрязнения им почв и факторы, влияющие на его поступление.

Материалы и методы исследования

Объекты исследований – древесина и внешняя часть коры, или корки (далее – кора) дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в высоковозрастных насаждениях наиболее распространенных типов дубрав на территории 30 ЧАЭС с ПЗ ^{137}Cs свыше 40 Ки/км².

Для исследований выбрали по два типа леса в экологических группах условно плакорных и пойменных дубовых лесов [16]. Согласно материалам лесоустройства, на указанной выше территории среди плакорных преобладают дубравы кисличные – 1089 га, что составляет 48,0 % от типа леса по заповеднику и 22,1 % на территории с ПЗ ^{137}Cs свыше 40 Ки/км², и снытевые (740 га, 87,3 и 15,0 %). В экологической группе пойменных дубрав наиболее распространены насаждения приустьевно-пойменного (836 га, 98,1 и 17,0 %) и злаково-пойменного (515 га, 61,0 и 10,5 %) типов леса. Суммарно на них приходится 61,2 % от площади дубрав заповедника и 64,6 % площади территории с высокой ПЗ ^{137}Cs , что говорит о репрезентативности типологической выборки.

Для каждого из перечисленных выше типов леса в разных частях 30 подобрали в натуре с уточнением типа леса и ТЛУ [17] по 5–8 насаждений возрастом старше 60 лет с преобладанием дуба в составе древостоев. В 2021 г. в них заложили 25 временных пробных площадей (ВПП) в соответствии с ТКП 498-2013 (02080) «Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения». Таксацию древостоев и расчет таксационных показателей на ВПП выполняли в соответствии с требованиями «Справочника таксатора» (Мирошников и др., 1980) с использованием «Таксационно-лесоустроительного справочника» (Кузьменков и др., 2019). Основные таксационные показатели верхних ярусов древостоев приведены в табл. 1.

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоев дуба

Table 1

Taxational characteristics of oak stands

Временные пробные площади	Состав древостоя	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета	Густота, шт./га		Сумма площадей сечений, м ² /га		Запас, м ³ /га	
			высота, м	диаметр, см		дуба	всево	дуба	всево	дуба	всево
Дубрава кисличная (Д ₂)											
3	10Д+Б	80	20,8	36,6	II	158	165	16,6	17,3	166	172
2	9Д1С+Б, Олч	100	22,5	50,7	III	94	124	18,5	20,4	195	213
1	10Д	110	22,1	39,1	III	204	204	24,5	24,5	256	256
4	9Д1Б+Ос	110	22,1	42,0	III	130	165	18,0	19,9	188	208
7	8Д1Олч1Б	115	24,3	58,9	III	56	220	15,3	21,4	175	225
5	10Д+Б, Ос	120	22,8	31,6	III	284	300	22,2	23,7	238	255
6	9Д1Ос+Кл	130	24,1	32,8	III	268	296	22,7	24,5	256	278
8	10Д+С	130	27,4	50,4	II	168	172	33,5	33,7	421	423
Дубрава снытевая (Д ₃)											
13	8Д2Кл	60	21,0	29,0	I	228	440	15,1	21,2	150	199
12	7Д1Олч1Кл1Ос	85	20,8	45,9	III	60	128	9,9	14,1	97	133
11	9Д1Олч+Б, Ос, Кл	100	22,7	54,9	III	66	353	15,6	18,3	167	191
10	9Д1Олч+С	110	20,8	46,2	III	79	131	13,3	16,1	132	155
15	5Д4Г1Ос+Кл, Олч	110	23,4	45,5	II	60	548	9,8	27,3	107	236
9	8Д2Кл+Олч	115	23,3	37,1	III	68	96	13,8	17,0	151	180
14	9Д1Олч+Лп, Ос, Кл	130	22,8	41,5	III	89	168	12,1	16,0	129	147
Дубрава злаково-пойменная (С _{2п} , С _{3п})											
20	7Д2Олч1Ос+Б	60	17,5	21,8	II	416	636	15,5	23,9	132	202
25	7Д3Б+Ос	70	19,2	23,5	II	378	630	16,3	26,1	152	227
23	8Д1Б1Ос+Олч	70	17,6	31,9	III	278	428	22,2	27,1	171	213
24	7Д3Олч+Ос	95	24,5	35,1	II	151	334	14,6	22,4	168	242
22	10Д+Ос	130	25,8	36,9	III	180	188	19,2	19,8	228	232

Временные пробные площади	Состав древостоя	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета	Густота, шт./га		Сумма площадей сечений, м ² /га		Запас, м ³ /га	
			высота, м	диаметр, см		дуба	всего	дуба	всего	дуба	всего
			дуба								
Дубрава прируслово-пойменная (А _{2п} , В _{2п} , В _{3п})											
16	9Д1С	65	9,1	29,6	V	347	363	20,3	21,6	150	162
19	10Д+Гч, Гш	70	11,6	28,6	IV	200	227	15,0	15,4	122	125
18	9Д1Гч	70	14,5	32,5	IV	220	223	18,2	19,0	142	152
17	9Д1Гч+Б, Гш	75	14,5	30,9	IV	152	157	11,4	12,1	112	121
20	9Д1Гч+Б	80	13,9	34,7	IV	176	232	16,6	19,0	130	153

На ВПП со второй декады августа по первую декаду сентября 2021 г. произвели отбор образцов почвы (в 12 точках), древесины и вторичной коры дуба в соответствии с ТКП 499-2013 (02080) «Радиационный мониторинг лесного фонда. Обследование постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения». Древесину отбирали на высоте 1,3 м возрастным буравом Мога (Швеция) у 50–60 деревьев I–III классов роста и развития (по Крафту) строго радиально до центра. Таким же способом на 10 ВПП отобрали по 20–30 образцов древесины у деревьев I–V классов роста и развития (по Крафту). На 11 ВПП разных типов леса керны древесины делили на три равные части – центральную, среднюю и периферийную. Отбор проб в древесине валежника (без коры) производили с лежащих деревьев путем пропила ствола переносной цепной пилой до центра на расстоянии 1,3 м от корневых лап в соответствии с ТКП 239-2010 (02080) «Радиационный контроль. Обследование лесосек. Порядок проведения». Величины загрязнения древесины ¹³⁷Cs в образцах, отобранных возрастным буравом и цепной бензиномоторной пилой, хорошо согласуются [18].

Подготовку образцов для анализа осуществляли в соответствии с ТКП 251-2010 (02080) «Радиационный контроль. Отбор и подготовка проб лесной продукции. Порядок проведения». Определение А_y ¹³⁷Cs в пробах почвы, древесины и коры дуба выполнено инструментально в лаборатории спектрометрии и радиохимии заповедника (аттестат аккредитации № ВУ/112 2.2203 от 30.01.2002 г.) на гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315 производства НПУП «Атомтех» (Минск, Беларусь).

Плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs рассчитывали в соответствии с ТКП 240-2010 (02080) «Радиационный контроль. Обследование земель лесного фонда. Порядок проведения».

Загрязнение ¹³⁷Cs неокоренных стволов дуба рассчитывали путем произведения средних удельных вкладов древесины (85,4 %) и коры (14,6 %) в общую их массу [12] на А_y ¹³⁷Cs в этих структурных частях деревьев на каждой ВПП и последующего их суммирования. Затем определяли средние арифметические значения А_y ¹³⁷Cs в древесине, коре и стволах дуба для всей совокупности насаждений (абсолютный вклад) и долю А_y ¹³⁷Cs в древесине и коре для среднего ствола данной породы в процентах (относительный вклад).

Оценку соответствия содержания ¹³⁷Cs в древесине, коре и неокоренных стволах дуба гигиеническому нормативу 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 (РДУ/ЛХ-2001)» производили для вероятной ошибки второго рода не более 5 %. Для этого для каждой ВПП определяли расчетную А_y ¹³⁷Cs в древесине и коре путем суммирования значений содержания ¹³⁷Cs в них с погрешностями их измерений. Для неокоренных стволов рассчитывали взвешенные погрешности древесины и коры с учетом удельного вклада древесины и коры в массу стволов и суммировали их с рассчитанной А_y ¹³⁷Cs в них.

Обработку материалов производили при помощи стандартных пакетов прикладных программ *Microsoft Excel 2010* и *Statistica 6.1*. Оценку достоверности различий (*t*) для двух сравниваемых малых выборок (*n* < 20) определяли по формуле:

$$t = (M_1 - M_2) \sqrt{\frac{1 - 2(n_1 + n_2)^{-1}}{\frac{\sigma_1^2}{n_2} + \frac{\sigma_2^2}{n_1}}}$$

где *M* – среднее значение выборки; *σ* – стандартное отклонение.

Результаты исследования и их обсуждение

Общеизвестно [4; 11; 12; 14; 15], что важнейшим фактором накопления радионуклидов древесными растениями является уровень поверхностного загрязнения ими почвы. В связи с высокой пространственной

неоднородностью радиоактивных выпадений в ЗО ЧАЭС [1; 4; 12; 15] частные определения ПЗ ^{137}Cs в исследованных насаждениях дуба варьируют в пределах математического порядка (184–1872 кБк/м²). Средняя арифметическая (средняя) ее величина (522 ± 86 кБк/м²) при выходящем за пределы выборки доверительном интервале (171–1996 кБк/м²) характеризуется высоким коэффициентом вариации (82,8 %) и на 22,2 % превышает среднее срединное значение, или медиану (427 кБк/м²).

Размах колебаний ПЗ ^{137}Cs в большинстве типов леса, за исключением дубравы злаково-пойменной, относительно узкий (рис. 1).

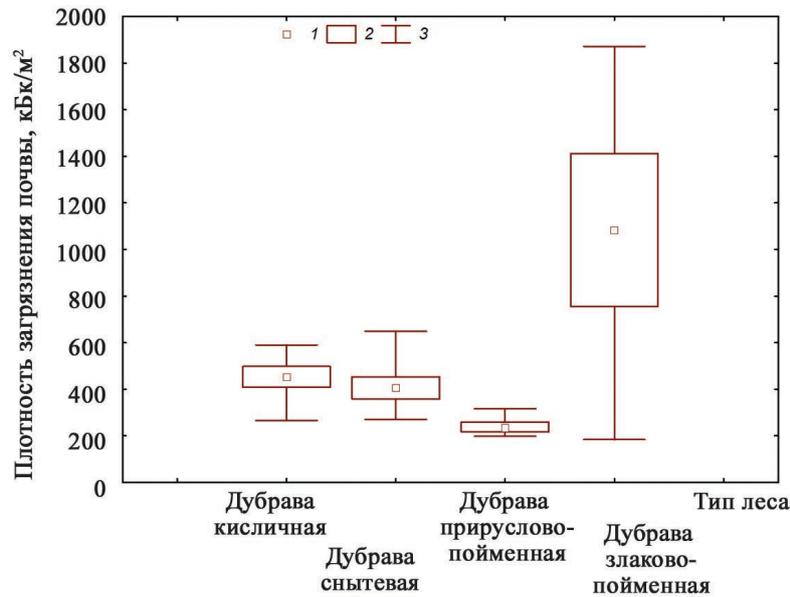


Рис. 1. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs , кБк/м²: 1 – среднее, 2 – среднее ± стандартная ошибка, 3 – минимум – максимум

Fig. 1. Soil contamination density ^{137}Cs , kBq m⁻²: 1 – average, 2 – average ± standard error, 3 – minimum – maximum

В ряду типов леса: дубрава прируслово-пойменная – дубрава снытевая – дубрава кисличная – дубрава злаково-пойменная увеличиваются средние (237 – 406 – 453 – 1084 кБк/м²) и медианные (222 – 383 – 491 – 1421 кБк/м²) значения ПЗ ^{137}Cs . Различия в загрязнении почв обусловлены рядом факторов. Важнейшим из них в ближней зоне является расстояние объектов исследований до места выброса радиоактивных веществ, определяющее количество, состав и форму выпадения радионуклидов [12; 15].

Совокупности переменных величин ПЗ ^{137}Cs (критерий $\chi^2 = 10,04$, вероятность ошибки $p = 0,002$) и рассчитанных по GPS-координатам расстояний между ВПП и ЧАЭС ($\chi^2 = 4,32$, $p = 0,013$) не представляют нормальное распределение. Между средними значениями этих показателей установлена обратная средняя высоко значимая по Чеддоку ($p < 0,001$) корреляционная связь (r -Спирмена = $-0,59$). Ее наличие обеспечено снижением интенсивности выпадений ^{137}Cs с удалением от места катастрофы [1; 4; 12], а невысокая сила связи – их территориальной мозаичностью.

Наибольшая ПЗ ^{137}Cs наблюдается в приближенных к ЧАЭС дубравах злаково-пойменных (в среднем на $26,6 \pm 6,8$ км) в сравнении с более удаленными от нее дубравами кисличными ($40,2 \pm 2,5$ км), снытевыми ($39,9 \pm 2,2$ км) и прируслово-пойменными ($39,3 \pm 1,7$ км). В насаждениях равноудаленных (в среднем) от места аварии типов леса различия в загрязнении почв радионуклидами определены условиями их осадения из атмосферы, геоморфологией поверхности, микрорельефом, типом биогеоценоза, составом древесного яруса [12; 14; 15; 19] и особенностями ландшафта, обусловившими как мозаичность выпадения, так и первичное и вторичное перераспределение радиоактивных веществ. Поэтому в редких низкорослых дубравах прируслово-пойменных, приуроченных к повышенным элементам рельефа на открытых и полуоткрытых участках поймы, в основном вблизи р. Припять и ее стариц, ПЗ ^{137}Cs на 95 % уровне значимости достоверно ниже в сравнении с высокоствольными дубравами кисличными ($t_{\text{факт.}} = 3,366 > t_{\text{табл.}} = 2,201$) и снытевыми ($t_{\text{факт.}} = 2,593 > t_{\text{табл.}} = 2,228$), локализованными в лесных массивах.

Основываясь на возрастании интенсивности миграции ^{137}Cs от свежих гигротопов к влажным и от богатых трофотопов к бедным [12], полагаем, что перераспределение радионуклида по вертикальному профилю почвы с опусканием некоторого его количества глубже 20 см ускорили снижение ПЗ ^{137}Cs в произрастающих на аллювиальных почвах легкого гранулометрического состава дубравах прируслово-пойменных и обеспечили некоторую (недостоверную) разницу между средними значениями данного показателя в дубравах кисличных и снытевых.

Частные величины $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине и в коре дуба сильно варьируют в пределах формации. Доверительные интервалы на 95 % уровне значимости находятся в пределах выборок. Средние значения $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине и коре дуба всех исследованных насаждений выше медианных на 37,1 и 59,1 % (табл. 2).

Таблица 2

Статистические показатели удельной активности ^{137}Cs в древесине и коре дуба, Бк/кг

Table 2

Statistical indicators of the specific activity of ^{137}Cs in oak wood and bark, Bq kg⁻¹

Статистический показатель	Дубрава кисличная	Дубрава снытевая	Дубрава прируслово-пойменная	Дубрава злаково-пойменная	Все дубравы
Древесина					
<i>n</i>	8	7	5	5	25
<i>Min – max</i>	404–1205	382–1038	208–621	698–3645	208–3645
<i>Ci</i>	635–1044	415–854	140–634	709–3626	618–1296
<i>M ± m</i>	839±86	634±90	387±89	2167±525	957±164
σ	245	237	199	1175	822
<i>Cv</i>	29,2	37,4	51,6	54,2	85,9
<i>Me</i>	838	653	263	2025	698
Кора					
<i>Min – max</i>	1372–4968	883–2398	338–1067	974–8806	338–8806
<i>Ci</i>	1414–3414	980–1953	242–1031	1610–9335	1484–3327
<i>M ± m</i>	2414±423	1467±199	637±142	5472±1391	2405±446
σ	1196	526	318	3111	2232
<i>Cv</i>	49,5	35,9	49,9	56,8	92,8
<i>Me</i>	2318	1511	539	6323	1511

Примечание. *n* – количество наблюдений (ВПП), *min* и *max* – минимальное и максимальное значения, *Ci* – доверительный интервал на 95 % уровне значимости, *M* – среднее арифметическое значение, $\pm m$ – стандартная ошибка среднего значения, σ – среднеквадратическое отклонение, *Cv* – коэффициент вариации, %, *Me* – среднее срединное значение, медиана.

Выборки $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине и коре дуба по типам леса, кроме дубравы злаково-пойменной, не имеют сильного разброса. Соотношение их максимальных и минимальных значений в дубравах кисличных, снытевых и прируслово-пойменных сравнительно небольшое – 2,7–3,0 раза в древесине и 2,7–3,6 раза в коре. В дубраве злаково-пойменной они составляют 17,5 и 26,0 раз соответственно.

В пойменных дубравах доверительные интервалы $A_y^{137}\text{Cs}$ как в древесине, так и в коре выходят за пределы выборок экспериментальных данных. В них медианные значения $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине дуба на 7,0 и 47,1 % ниже средних. В коре разница между этими значениями составляет +18,2 и –15,6 % соответственно. В плакорных дубравах средние срединные и средние арифметические значения $A_y^{137}\text{Cs}$ в данных структурных компонентах ствола близки между собой.

Средние и медианные значения $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине и коре дуба увеличиваются в типологическом ряду дубрава прируслово-пойменная < дубрава снытевая < дубрава кисличная < дубрава злаково-пойменная, то есть синхронно с повышением загрязнения радионуклидом почв. При этом достоверные различия средних величин данного показателя на 95 % уровне значимости наблюдаются между большинством типов леса в обоих структурных частях ствола (табл. 3). Учитывая прямую зависимость содержания ^{137}Cs в древесине и коре древесных пород от ПЗ ^{137}Cs [12; 14; 15], недостоверность различий средних величин $A_y^{137}\text{Cs}$ между отдельными типами дубрав обусловлена близкими уровнями ПЗ ^{137}Cs в них.

Таблица 3

Достоверность различий удельной активности ^{137}Cs в древесине (числитель) и коре (знаменатель) дуба между типами леса

Table 3

Reliability of differences in specific activity ^{137}Cs in oak wood (numerator) and bark (denominator) between forest types

Тип леса	Дубрава кисличная	Дубрава снытевая	Дубрава прируслово-пойменная
Дубрава снытевая	1,528 / 1,804	–	–
Дубрава прируслово-пойменная	3,193* / 2,991*	1,735 / 2,868*	–
Дубрава злаково-пойменная	2,843* / 2,300*	3,065* / 3,049*	2,987* / 3,092*

Примечание. * – различия достоверны на 95 % уровне значимости.

Установлены высоко значимые ($p < 0,001$) тесные корреляционные связи между ПЗ ^{137}Cs и A_y ^{137}Cs в древесине (r -Спирмена = 0,78) и коре (0,81) дуба. Использование данного коэффициента корреляции определено ненормальным распределением совокупности переменных величин A_y ^{137}Cs в древесине ($\chi^2 = 6,93$, $p = 0,008$), коре ($\chi^2 = 4,89$, $p = 0,029$) и ПЗ ^{137}Cs . Прослеживается отрицательная слабая значимая ($p < 0,05$) связь A_y ^{137}Cs в древесине дуба (r -Спирмена = $-0,41$), и слабая незначимая ($p > 0,05$) – в коре ($r = -0,35$) с расстоянием до ЧАЭС.

Между A_y ^{137}Cs в древесине и коре дуба наблюдается высоко значимая ($p < 0,001$) очень высокая корреляция (r -Спирмена = 0,92). Высокий коэффициент корреляции между ними ($r = 0,932 \pm 0,048$) приводится в работе [12].

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в древесину дуба в целом по формации характеризуются небольшим размахом колебаний, укладываясь в относительно узкий диапазон значений ($(0,8-3,8) \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$). Доверительный интервал находится в границах выборки. Средняя их величина незначительно (на 11,8 %) превышает медиану. В дубравах кисличных, снытевых и прируслово-пойменных средние значения K_n ^{137}Cs в древесину близки между собой ($(1,6-2,5) \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$) и в 1,3–1,6 раза ниже данного показателя в дубраве злаково-пойменной (табл. 4).

Таблица 4

Статистические показатели коэффициентов перехода ^{137}Cs в древесину и кору дуба, $n \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

Table 4

Statistical indicators of ^{137}Cs transition coefficients in oak wood and bark, $n \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ kg}^{-1}$

Статистический показатель	Дубрава кисличная	Дубрава снытевая	Дубрава прируслово-пойменная	Дубрава злаково-пойменная	Все дубравы
<i>n</i>	8	7	5	5	25
Древесина					
<i>Min – max</i>	1,4–2,5	1,1–2,1	0,8–3,0	1,4–3,8	0,8–3,8
<i>Ci</i>	1,6–2,2	1,3–1,8	0,5–2,9	1,2–3,8	1,6–2,2
<i>M ± m</i>	1,9 ± 0,14	1,6 ± 0,12	1,7 ± 0,43	2,5 ± 0,48	1,9 ± 0,15
σ	0,4	0,3	1,0	1,1	0,7
<i>Cv</i>	20,7	20,6	57,9	42,1	39,1
<i>Me</i>	2,0	1,5	1,3	2,0	1,7
Кора					
<i>Min – max</i>	3,0–9,2	2,0–4,2	1,1–4,3	4,4–8,9	1,1–9,2
<i>M ± m</i>	5,3 ± 0,67	3,7 ± 0,29	2,8 ± 0,64	5,6 ± 0,83	4,4 ± 0,37
<i>Ci</i>	3,7–6,9	2,9–4,4	1,0–4,6	3,3–7,9	3,6–5,2
σ	1,9	0,8	1,4	1,8	1,8
<i>Cv</i>	35,5	21,1	51,5	32,8	41,8
<i>Me</i>	5,2	4,0	2,7	4,9	4,2

В плакорных насаждениях дуба средние значения K_n ^{137}Cs в древесину близки к срединным; в пойменных, где доверительные интервалы несколько выходят за нижние границы выборок экспериментальных данных, они на 25–31 % выше медиан. Существенно различаются между собой коэффициенты вариации средних величин между экологическими группами дубрав.

Частные K_n ^{137}Cs в кору дуба и размах их колебаний по типам леса и в целом по формации выше соответствующих значений K_n ^{137}Cs в древесину (табл. 4). Соотношение максимальных и минимальных величин этого показателя по типам леса невысокое (2,0–3,9 раза), по формации оно возрастает до 8,4 раза.

Диапазон колебания средних значений K_n ^{137}Cs в кору дуба по типам леса составляет $(2,8-5,6) \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ при вариабельности 21,1–51,5 %. В большинстве типов доверительные интервалы выходят за границы выборок. Медианные значения располагаются в более узких пределах ($(2,7-5,2) \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$). Отклонение их от средних арифметических составляет от $-14,3$ до $+8,1$ %. Повышенные значения обоих средних величин характерны для дубрав кисличных и злаково-пойменных.

Превышения средних и срединных значений содержания ^{137}Cs в коре дуба в сравнении с древесиной по типам леса составляют 1,6–2,9 и 2,0–3,1 раза, по формации – 2,5 и 2,2 раза. Близки к ним и соотношения K_n ^{137}Cs в части ствола – 1,6–2,8 и 2,1–2,7 раз по типам леса и 2,3 и 2,5 раз для формации.

Полагаем, что более высокие показатели загрязнения коры дуба в сравнении с древесиной обусловлены морфо-физиологическими особенностями сравниваемых компонентов. В наружной коре депонированный ^{137}Cs почти неподвижен. В то же время в древесине протекают динамичные процессы перераспределения его запасов по всему стволу [4; 12; 15; 20], а текущее содержание подвержено сезонным изменениям и годовым флуктуациям в зависимости от почвенных (главным образом от ее влажности) и метеорологических (осадки) условий [4; 9; 12; 15; 20].

В неокоренных стволах дуба размах колебаний A_y ^{137}Cs по насаждениям достигает 18,9 раза, абсолютного вклада коры в общую A_y ^{137}Cs ствола – 26,2, древесины – 17,5 раза. Средняя для дубрав величина A_y ^{137}Cs в стволах (доверительный интервал находится в границах анализируемой выборки) составляет 1168 ± 204 Бк/кг при абсолютном вкладе древесины 817 ± 140 Бк/кг, коры – 351 ± 65 Бк/кг. Эти показатели характеризуются высокой вариабельностью (табл. 5).

Таблица 5

Статистические показатели вклада удельной активности древесины и коры в загрязнение ^{137}Cs стволов дуба ($n = 25$)

Table 5

Statistical indicators of the contribution of wood and bark specific activity in ^{137}Cs oak trunks contamination ($n = 25$)

Статистический показатель	Неокоренный ствол	Абсолютный вклад, Бк/кг		Относительный вклад, %	
		древесины	коры	древесины	коры
<i>Min-max</i>	233–4399	178–3113	49–1286	58,7–82,1	17,9–41,3
<i>M±m</i>	1168 ± 204	817 ± 140	351 ± 65	$71,5 \pm 1,2$	$28,5 \pm 1,27$
<i>Ci</i>	747–1589	527–1107	217–486	69,1–73,9	26,1–30,9
σ	1020	702	326	5,8	5,8
<i>Cv</i>	87,3	85,9	92,8	8,2	20,5

Относительный вклад древесины в общую активность ^{137}Cs в деловой части неокоренного ствола дуба во второй половине 1990-х гг. составлял 33,5 %, коры – 66,5, в вершинной – 27,3 и 72,7 % соответственно [12]. К 2021 г. эта пропорция кардинально изменилась. Доля среднего вклада древесины в A_y ^{137}Cs неокоренного ствола этой породы выросла до 71,5 %, коры – снизилась до 28,5 % при существенном колебании данных показателей, прежде всего коры, по насаждениям (табл. 5). Полагаем, что изменение вклада каждого из этих компонентов в общее загрязнение стволов ^{137}Cs произошло в результате более резкого замедления поступления радионуклида в кору со временем в сравнении с древесиной. Так, во второй половине 1990-х гг. средний K_n ^{137}Cs в древесину дуба составлял $(2,44 \pm 0,15) \times 10^{-3}$ м²/кг, в кору – $(8,42 \pm 0,61) \times 10^{-3}$ м²/кг [12]. К 2021 г. они уменьшились в 1,28 и 1,91 раза соответственно (табл. 4). Разница в темпах снижения перехода ^{137}Cs в сравниваемые компоненты ствола составила 1,5 раза.

Установлены значимая ($p < 0,05$) обратная слабая корреляционная связь (r -Спирмена = $-0,44$) между A_y ^{137}Cs в неокоренных стволах дуба с расстоянием до ЧАЭС и высокозначимая ($p < 0,001$) высокая ($r = 0,80$) – с ПЗ ^{137}Cs : выборки сравниваемых величин, включая A_y ^{137}Cs в неокоренных стволах дуба ($\chi^2 = 6,46$, $p = 0,011$), характеризуются ненормальным распределением.

В работах [4; 12; 14; 15; 21] указывается на неоднозначные связи показателей накопления ^{137}Cs в древесине, преимущественно сосны, с возрастом древостоев и на влияние на этот процесс их густоты. Установлено, что нормальное распределение имеют совокупности всех таксационных показателей господствующих ярусов древостоев дуба, кроме класса бонитета (табл. 6), а также K_n ^{137}Cs в древесину ($\chi^2 = 0,87$, $p = 0,351$) и кору ($\chi^2 = 2,16$, $p = 0,141$), ненормальное – совокупности переменных величин A_y ^{137}Cs в древесине, коре и неокоренных стволах дуба (приведены выше).

Выявлены корреляционные связи (r -Спирмена) разной значимости и силы между A_y ^{137}Cs в древесине, коре и неокоренных стволах дуба, с одной стороны, а с другой – средней высотой, классом бонитета, запасом древесины дуба, общей суммой площадей сечения и общим запасом древостоев (табл. 6). Коэффициенты перехода ^{137}Cs в кору имеют преимущественно средние значимые и высоко значимые корреляции Пирсона с показателями абсолютной полноты и запаса дуба, а также верхних ярусов древостоев в целом. Отметим слабые значимые корреляции K_n ^{137}Cs в кору со средней высотой и возрастом древостоев. Связи K_n ^{137}Cs в древесину с таксационными характеристиками дубрав не выражены. Значимых корреляций загрязнения структурных компонентов стволов дуба ^{137}Cs со средним диаметром и густотой древостоев не установлено. Анализ показывает, что ^{137}Cs интенсивнее накапливается в древесине и коре деревьев дуба в более быстрорастущих и продуктивных насаждениях.

Таблица 6

Проверка на нормальность распределения и коэффициенты корреляции (Спирмена, Пирсона) таксационных показателей древостоев с показателями загрязнения ¹³⁷Cs компонентом стволов дуба (n = 25)

Table 6

Checking for the normality of the distribution of taxation indicators of forest stands and their correlation coefficients (Spearman, Pearson) with indicators of ¹³⁷Cs contamination of components of oak trunks (n = 25)

Показатель	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета	Число стволов, шт./га		Сумма площадей сечений, м ² /га		Запас, м ³ /га		
		высота, м	диаметр, см		дуба	общее	дуба	общая	дуба	общий	
	дуба										
Проверка на нормальность распределения											
χ^2	3,63	1,19	2,59	13,80	0,75	2,42	2,29	1,08	3,33	1,52	
<i>P</i>	0,057	0,275	0,108	0,000	0,386	0,120	0,130	0,299	0,068	0,217	
Удельная активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг											
<i>r</i> -Спирмена	в древесине	0,32	0,52	-0,10	0,42	0,27	0,22	0,28	0,57	0,52	0,68
	в коре	0,36	0,60	-0,03	0,40	0,22	0,20	0,24	0,55	0,52	0,73
	в стволах	0,33	0,54	-0,10	0,61	0,26	0,24	0,26	0,58	0,50	0,71
Коэффициенты перехода ¹³⁷ Cs, n×10 ⁻³ м ² /кг											
<i>r</i> -Пирсона	в древесине	0,09	0,04	-0,08	-0,02	0,22	0,10	0,39	0,37	0,28	0,24
	в коре	0,45	0,52	0,13	0,36	0,10	-0,02	0,63	0,58	0,71	0,70
<i>P</i> _{0,05} = 0,40; <i>P</i> _{0,01} = 0,50; <i>P</i> _{0,001} = 0,62											

Распределение A_y ¹³⁷Cs в древесине деревьев дуба различных классов роста и развития (по Крафту) и валежнике (рис. 2) существенно различается по отдельным насаждениям при определенном сходстве между некоторыми из них (ВПП 4, 14 и 22).

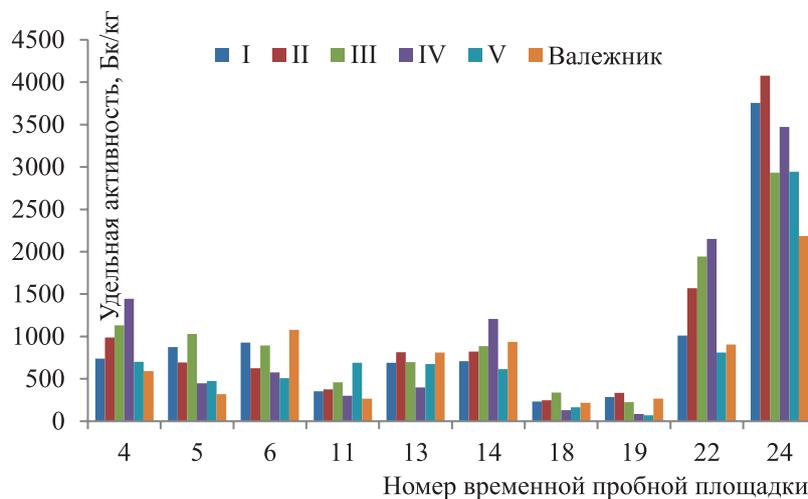


Рис. 2. Величины удельной активности ¹³⁷Cs в древесине дуба по классам роста и развития деревьев (I–V) и валежнике по насаждениям

Fig. 2. The values of the specific activity of ¹³⁷Cs in oak wood by classes of growth and development of trees (I–V) and dead wood by stands

В целом для дубовой формации (табл. 7) размах крайних значений A_y ¹³⁷Cs в древесине деревьев разных классов роста и развития превышает математический порядок. Отношения A_y max/ A_y min у деревьев I–III классов Крафта (13,1–16,4) в несколько раз ниже в сравнении с деревьями IV и V классов (40,0 и 42,7).

В валежнике оно минимально (10,0). Высокая изменчивость индивидуальных величин по насаждениям обеспечила высокие значения ошибок и коэффициентов вариации средних $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине всех классов роста и развития в валежнике, доверительные интервалы которых, за единичным несущественным отклонением, не выходят за границы выборок.

Таблица 7

Статистические показатели удельной активности ^{137}Cs в древесине дуба по классам роста и развития деревьев и валежнике ($n = 10$), Бк/кг

Table 7

Statistical indicators of the specific activity of ^{137}Cs in oak wood by classes of growth and development of trees and dead wood ($n = 10$), Bk kg⁻¹

Статистический показатель	Классы роста и развития деревьев					Валежник
	I класс	II класс	III класс	IV класс	V класс	
<i>Min – max</i>	234–3756	249–4075	224–2934	86–3473	69–2943	219–2185
<i>Ci</i>	228–1687	249–1861	466–1641	246–1798	192–1338	332–1184
<i>M ± m</i>	958 ± 323	1055 ± 357	1053 ± 260	1022 ± 343	765 ± 253	758 ± 188
σ	1020	1128	821	1086	801	595
<i>Cv</i>	106,5	107,0	78,0	106,2	104,7	78,6

Древесина живых деревьев (I–IV классы Крафта) имеет близкие средние значения $A_y^{137}\text{Cs}$ при несущественно (на 6,3–9,2 %) пониженной величине данного показателя в прегосподствующих деревьях I класса роста и развития. В сухостое она ниже на 25,1–27,4 %, в валежнике – на 25,8–28,1 %, что, вероятно, обусловлено отсутствием корневого поступления радионуклида в мертвые деревья.

Древесина лесообразующих пород по радиальному профилю ствола загрязнена ^{137}Cs неравномерно. Общим для большинства видов является максимальное содержание радионуклида во внешнем годовичном кольце, которое с разной интенсивностью снижается по направлению к центру. У ядровых пород, к которым относится дуб, $A_y^{137}\text{Cs}$ в заболонной части древесины значительно выше, чем в ядровой [15]. У дуба в пределах заболони содержание радионуклида в древесине резко падает от крайнего годовичного кольца до ядра, в котором его концентрация постепенно уменьшается и ближе к сердцевине переходит в плато [4]. Согласно работе [12], в радиальном направлении ствола дуба загрязнение древесины ^{137}Cs резко снижается в немногочисленных периферических годовичных слоях, затем на большей части ствола наблюдается плато $A_y^{137}\text{Cs}$ с небольшими колебаниями в отдельных кольцах, уменьшаясь почти в 5 раз к сердцевине.

В исследованных дубравах для каждого типа леса и для формации в целом характерна общая тенденция снижения $A_y^{137}\text{Cs}$ в древесине дуба от периферии до средней и центральной частей ствола (рис. 3).

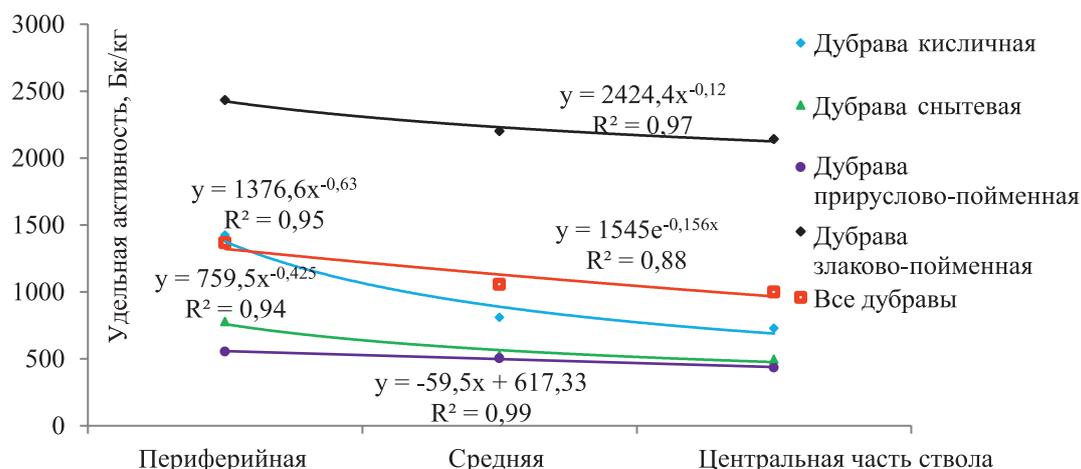


Рис. 3. Изменение удельной активности ^{137}Cs в древесине дуба по радиальному профилю ствола

Fig. 3. Change in the specific activity of ^{137}Cs in oak wood along the radial profile of the trunk

Заготовка древесной продукции на радиоактивно загрязненных землях регламентируется гигиеническим нормативом 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 (РДУ/ЛХ-2001)». На территории с высокой ПЗ ^{137}Cs окоренная древесина дуба по содержанию этого радионуклида соответствует нормативу 1480 Бк/кг в 84 % обследованных насаждений, неокоренная – в 72 %, а нормативу 740 Бк/кг – окоренная и неокоренная древесина в 32 % древостоев. Загрязнение этим радионуклидом коры как технологического сырья оказалось ниже нормируемого уровня в 36 % насаждений, а также прочей непищевой продукции лесного хозяйства – в 52 % (табл. 8).

Таблица 8

Доля насаждений дуба, соответствующих санитарным нормам Республики Беларусь по содержанию ^{137}Cs в древесине и коре, %

Table 8

The proportion of oak stands that accord the sanitary standards of the Republic of Belarus by ^{137}Cs content in wood and bark, %

Тип леса	Древесина				Кора	
	окоренная		неокоренная		технологическое сырье	прочая непищевая продукция
Норматив, Бк/кг	1480	740	1480	740	1480	1850
Дубрава прируслово-пойменная	100,0	80,0	100,0	80,0	100,0	100,0
Дубрава снытевая	100,0	42,8	85,7	42,8	42,8	57,1
Дубрава кисличная	100,0	12,5	75,0	12,5	0,0	37,5
Дубрава злаково-пойменная	20,0	0,0	20,0	0,0	20,0	20,0
Все дубравы	84,0	32,0	72,0	32,0	36,0	52,0

В типологическом аспекте наиболее «чистые» древесина и кора дуба находятся в дубравах прируслово-пойменных, наиболее «грязные» – злаково-пойменных. Нормативу 1480 Бк/кг соответствует окоренная древесина во всех исследованных насаждениях большинства типов леса, кроме дубравы злаково-пойменной, где уровню содержания ^{137}Cs соответствует только каждое пятое насаждение. Доля древостоев, в которых окоренная древесина этой породы соответствует нормативу 740 Бк/кг, а неокоренная – нормативам 1480 Бк/кг и 740 Бк/кг снижается в типологическом ряду дубрава прируслово-пойменная – дубрава снытевая – дубрава кисличная – дубрава злаково-пойменная. Количество насаждений с допустимыми уровнями содержания ^{137}Cs в коре дуба снижается от прируслово-пойменных и снытевых дубрав до злаково-пойменных и кисличных.

Заключение

В дубравах ЗО ЧАЭС (Полесский заповедник) поверхностное загрязнение почвы ^{137}Cs изменяется в широком диапазоне значений (184–1872 кБк/м², или 5,0–50,6 Ки/км²), что связано с разным удалением насаждений от ЧАЭС, условиями осадения и территориальной мозаичностью радиоактивных выпадений, а также особенностями последующего их перераспределения. Просматривается тенденция повышения ПЗ ^{137}Cs в ряду дубрава прируслово-пойменная < дубрава снытевая < дубрава кисличная < дубрава злаково-пойменная.

Индивидуальные значения A_y ^{137}Cs в древесине (208–3645 Бк/кг), коре (338–8806 Бк/кг) и неокоренных стволах (233–4399 Бк/кг) дуба характеризуются большими размахами колебаний по насаждениям, имеют тесные корреляции с уровнями поверхностного загрязнения почвы данным радионуклидом и слабые – с расстоянием до ЧАЭС. Средние их значения в типологическом ряду распределяются аналогично ПЗ ^{137}Cs при достоверных различиях между большинством типов леса. Пропорции относительных вкладов древесины и коры в A_y ^{137}Cs ствола этой породы за 25 лет кардинально изменились.

Диапазон частных K_n ^{137}Cs в древесину дуба относительно узкий ($(0,8–3,8) \times 10^{-3}$ м²/кг), в кору – значительно шире ($(1,1–9,2) \times 10^{-3}$ м²/кг). Средние K_n ^{137}Cs в древесину в дубравах кисличных, снытевых и прируслово-пойменных близки; средние K_n ^{137}Cs в кору увеличиваются синхронно с ПЗ ^{137}Cs .

Интенсивность накопления ^{137}Cs в древесине, коре и стволах дуба в определенной мере связана с продуктивностью древостоев. Распределение A_y ^{137}Cs в древесине деревьев дуба по классам роста и развития в насаждениях не выражено. Средние ее величины в деревьях I–IV классов близки, в сухостое и валежнике они на 25–28 % ниже. Подтверждена общая тенденция снижения A_y ^{137}Cs в древесине дуба от периферии к сердцевине.

На территории ЗО ЧАЭС с высокой ПЗ ^{137}Cs окоренная древесина дуба в 84 %, неокоренная – в 72 % насаждений по содержанию данного радионуклида соответствует гигиеническому нормативу Республики Беларусь РДУ/ЛХ-2001 на лесоматериалы круглые прочие 1480 Бк/кг, в третьей их части – нормативу 740 Бк/кг. В половине дубрав возможна заготовка коры, в качестве прочей непищевой продукции лесного хозяйства и в третьей их части – в качестве технологического сырья. Удельный вес насаждений дуба, пригодных для заготовки древесинной продукции, различается по типам леса.

Следует учитывать, что в ЗО ЧАЭС выпало более 70 % ^{90}Sr и более 97 % трансурановых элементов, выброшенных при аварии [2], по которым лесная продукция в Беларуси не нормируется. Поэтому представляется целесообразным разработать и принять допустимых уровней радиоактивного загрязнения древесины по содержанию в ней ^{90}Sr , ^{241}Am , изотопов плутония и, прежде всего, в дровяной древесине.

Библиографические ссылки

1. Израэль ЮА, Богдевич ИМ, Аверин ВС. *Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь)*. Москва: Фонд «Инфосфера»–НИА–Природа; Минск: Белкартография; 2009. 140 с.
2. 35 лет после Чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления ее последствий. В: *Национальный доклад Республики Беларусь*. Минск: ИВЦ Минфина; 2020. 152 с.
3. Дворник АМ, Жученко ТА. Динамика древесных ресурсов в загрязненных радионуклидами районах Беларуси и прогнозная оценка накопления радионуклидов древесным ярусом. *Чернобыль: Экология и здоровье*. 1998;1(5):5–9.
4. Ипатьев ВА, Багинский ВФ, Булавик ИМ. *Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации*. Гомель: Речицкая укрупненная типография; 1999. 454 с.
5. Багинский ВФ, Кудин МВ. Прогноз лесопользования в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике в связи с динамикой радиоэкологической обстановки. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2010;70:403–414.
6. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr компонентами древостоя, подроста и подлеска в дубравах зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2019;79:236–247.
7. Лазарева МС, Климович ЛК, Климов АВ. Особенности формирования дубравы кисличной. *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. Естественные науки*. 2020;6(123):50–55.
8. Углынец АВ, Гарбарук ДК, Шумак СВ. Динамика и продуктивность дубрав в условиях отсутствия хозяйственной деятельности на юго-востоке Белорусского Полесья. *Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов*. 2022;2(258):55–66. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-258-2-55-66.
9. Булавик ИМ, Переволоцкий АН, Гайдунь АЗ. Влияние различных факторов на накопление ^{137}Cs древесными растениями. В: *10 лет Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику*. Минск: Н. Б. Киреев; 1998. с. 59–70.
10. Углынец АВ, Гарбарук ДК, Шумак СВ. Накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr компонентами древостоя в черноольшаниках зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2020;80:246–256.
11. Парфёнов ВИ, Якушев БИ, Мартинович БС, и др. *Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси*. Минск: Навука і тэхніка; 1995. 578 с.
12. Переволоцкий АН. *Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах*. Гомель: Институт радиологии; 2006. 255 с.
13. Булко НИ, Шабалева МА, Толкачева НВ, и др. Особенности аномального поступления ^{137}Cs в основные лесобразующие породы на территории западного следа аварии на ЧАЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2010;70:422–434.
14. Краснов ВП, Орлов АА, Бузун ВА и др. *Прикладна радіоекологія лісу*. Житомир: Полісся; 2007. 680 с.
15. Щеглов АИ. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах. В: *По материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС*. Москва: Наука; 2000. 268 с.
16. Юркевич ИД, Ловчий НФ, Гельтман ВС. *Леса Белорусского Полесья (геоботанические исследования)*. Минск: Наука и техника; 1977. 288 с.
17. Юркевич ИД. *Выделение типов леса при лесоустроительных работах*. Минск: Наука и техника; 1980. 120 с.
18. Забродский ВН, Углынец АВ, Калинин ВН. Влияние типа леса и типа лесорастительных условий на переход ^{137}Cs и ^{90}Sr в древесину сосны в зоне отчуждения ЧАЭС по данным радиационного обследования лесосек. В: *Современные проблемы радиобиологии – 2021*. Минск: ИВЦ Минфина; 2021. с. 68–72.
19. Гуров ВН, Керцман ВН. Рельеф как фактор возможного перемещения радионуклидов. В: *Геохимические пути миграции искусственных радионуклидов в биосфере*. Пушино: [б. и.]; 1991. с. 17.
20. Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ^{137}Cs by forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40:105–113.
21. Барабошкин АВ, Карбанович ЛН, Булко НИ, и др. Факторы, влияющие на загрязнение цезием-137 древесины основных лесобразующих пород. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2005;63:451–454.

References

1. Izrael' YuA, Bogdevich IM, Averin VS. *Atlas sovremennykh i prognoznykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AES na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya–Belarus')* [Atlas of recent and predictable aspects of consequences of

- Chernobyl accident on polluted territories of Russia and Belarus (ARPA Russia–Belarus)]. Moscow: Fond «Infosfera» –NIA–Priroda; Minsk: Belkartografiya; 2009. 140 p. Russian.
2. 35 let posle Chernobyl'skoi katastrofy: itogi i perspektivy preodoleniya ee posledstviy. V: *Natsional'nyi doklad Respubliki Belarus'* [35 years after the Chernobyl disaster: results and prospects of overcoming its consequences]. In: *National Report of the Republic of Belarus*. Minsk: IVTs Minfina; 2020. 152 p. Russian.
 3. Dvornik AM, Zhuchenko TA. *Dinamika drevesnykh resursov v zagryaznennykh radionuklidami raionakh Belarusi i prognoznaya otsenka nakopleniya radionuklidov drevesnym yarusom* [Dynamics of wood resources in radionuclide-contaminated areas of Belarus and forecast assessment of the accumulation of radionuclides by the wood layer]. *Chernobyl': Ekologiya i zdorov'e*. 1998;1(5):5–9. Russian.
 4. Ipat'ev VA, Baginskii VF, Bulavik IM. *Les. Chelovek. Chernobyl'. Lesnye ekosistemy posle avarii na Chernobyl'skoi AES: sostoyanie, prognoz, reaktsiya naseleniya, puti reabilitatsii* [Forest. Human. Chernobyl. Forest ecosystems after the accident at the Chernobyl NPP: condition, prediction, response of the population, ways of rehabilitation]. Gomel: Rechitskaya ukрупnennaya tipografiya; 1999. 454 p. Russian.
 5. Baginskii VF, Kudin MV. *Prognoz lesopol'zovaniya v Polesskom gosudarstvennom radiatsionno-ekologicheskom zapovednike v svyazi s dinamikoi radioekologicheskoi obstanovki* [Forecast of felling volumes in the Polesye State Radiation and Ecological Nature Reserve in the context of the dynamics of radioecological situation]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2010;70:403–414. Russian.
 6. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Nakoplenie ¹³⁷Cs i ⁹⁰Sr komponentami drevostoya, podrosta i podleska v dubravakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr accumulation of stand, regrowth and undergrowth components in oak forests of the Chernobyl NPP exclusion zone]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2019;79:236–247. Russian.
 7. Lazareva MS, Klimovich LK, Klimov AV. *Osobennosti formirovaniya dubravy kislichnoi* [Features of the formation of sour oak]. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta im. F. Skoriny. Estestvennye nauki*. 2020;6(123):50–55. Russian.
 8. Uglyanets AV, Garbaruk DK, Shumak SV. *Dinamika i produktivnost' dubrav v usloviyakh otsutstviya khozyaistvennoi deyatel'nosti na yugo-vostoke Belorusskogo Poles'ya* [Dynamics and productivity of oak forests in the absence of economic activities in the south-east of the Belarusian Polesye]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaistvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov*. 2022;2(258):55–66. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-258-2-55–66. Russian.
 9. Bulavik IM, Perevolotskii AN, Gaidul' AZ. *Influence of various factors on the accumulation of ¹³⁷Cs by woody plants*. In: *10 let Polesskomu gosudarstvennomu radiatsionno-ekologicheskomu zapovedniku*. Minsk: NB Kireev; 1998. p. 59–70. Russian.
 10. Uglyanets AV, Garbaruk DK, Shumak SV. *Nakoplenie ¹³⁷Cs i ⁹⁰Sr komponentami drevostoya v chernoal'shanikakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr accumulation of stand components in black alder forests of the Chernobyl NPP exclusion zone]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2020;80:246–256. Russian.
 11. Parfenov VI, Yakushev BI, Martinovich BS, et al. *Radioaktivnoe zagryaznenie rastitel'nosti Belarusi* [Radioactive contamination of vegetation in Belarus]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1995. 578 p. Russian.
 12. Perevolotskii AN. *Raspreделение ¹³⁷Cs i ⁹⁰Sr v lesnykh biogeotsenozakh* [Distribution ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in forest biogeocenoses]. Gomel: Institut radiologii; 2006. 255 p. Russian.
 13. Bulko NI, Shabaleva MA, Tolkacheva NV, et al. *Osobennosti anomal'nogo postupleniya ¹³⁷Cs v osnovnye lesoobrazuyushchie porody na territorii zapadnogo sleda avarii na ChAES* [The peculiarities of the anomalous uptake of ¹³⁷Cs into major forest-forming species occurring in the area affected by the western trace of the Chernobyl accident]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2010;70:422–434. Russian.
 14. Krasnov VP, Orlov AA, Buzun VA, et al. *Prikladnaya radioekologiya lesa* [Applied radioecology of the forest]. Zhytomyr: Poles'e; 2007. 680 p. Ukrainian.
 15. Shcheglov AI. *Biogeokhimiya tekhnogennykh radionuklidov v lesnykh ekosistemakh*. V: *Po materialam 10-letnikh issledovaniy v zone vliyaniya avarii na ChAES* [Biogeochemical migration of technogenic radionuclides in forest ecosystems: by the materials of 10-year research in the area effected]. In: *By the Chernobyl accident*. Moscow: Nauka; 2000. 268 p. Russian.
 16. Yurkevich ID, Lovchii NF, Gel'tman VS. *Les Belorusskogo Poles'ya (geobotanicheskie issledovaniya)* [Forests of the Belarusian Polesie (geobotanical research)]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1977. 288 p. Russian.
 17. Yurkevich ID. *Vydelenie tipov lesa pri lesoustroitel'nykh rabotakh* [Identification of forest types in forest managements operations]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1980. 120 p. Russian.
 18. Zabrodskii VN, Uglyanets AV, Kalinin VN. *Vliyanie tipa lesa i tipa lesorastitel'nykh uslovii na perekhod ¹³⁷Cs i ⁹⁰Sr v drevesinu sosny v zone otchuzhdeniya ChAES po dannym radiatsionnogo obsledovaniya lesekh* [Influence of forest type of forest conditions on the transfer ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr to pine wood in the Chernobyl NPP exclusion zone according to the results of the radiation examination of cutting areas]. In: *Sovremennyye problemy radiobiologii – 2021* [Contemporary issues of radiobiology – 2021]. Minsk: IVC Minfina; 2021. p. 68–72. Russian.
 19. Gurov VN, Kertsman VN. *Rel'ef kak faktor vozmozhnogo peremeshcheniya radionuklidov* [Relief as a factor of possible movement of radionuclides]. In: *Geokhimicheskie puti migratsii iskusstvennykh radionuklidov v biosfere* [Geochemical migration routes of artificial radionuclides in the biosphere]. Pushchino: [publisher unknown]; 1991. p. 17. Russian.
 20. Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, et al. *Identification of processes governing long-term accumulation of ¹³⁷Cs by forest trees following the Chernobyl accident*. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40:105–113.
 21. Baraboshkin AV, Karbanovich LN, Bulko NI, et al. *Faktory vliyayushchie na zagryaznenie tseziem-137 drevesiny osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod* [Factors affecting the contamination of cesium-137 wood of the main forest-forming species]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2005;63:451–454. Russian.

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 614.876:621.039.58

ОЦЕНКА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ОТ ЖИДКИХ СБРОСОВ БЕЛОРУССКОЙ АЭС В РЕЖИМЕ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Л. Ф. РОЗДЯЛОВСКАЯ¹⁾, Е. В. НИКОЛАЕНКО¹⁾, Д. И. ГУСЕЙНОВА¹⁾, В. В. КЛЯУС¹⁾

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

Радиационная безопасность населения от жидких сбросов Белорусской АЭС (далее – БелАЭС) в поверхностные водоемы считается обеспеченной, если обусловленная этими сбросами доза облучения населения не превышает значения граничной дозы (далее – ГД), установленной санитарными нормами и правилами по обеспечению радиационной безопасности – 50 мкЗв/год. При наличии предпосылок к возможности снижения указанного норматива он может быть пересмотрен по решению учреждений государственного санитарного надзора на основании оценок годовых эффективных доз облучения населения (далее – ГЭД) за определенный период эксплуатации АЭС. Цель исследования: рассмотрение правомерности установленного значения норматива ГД путем его сравнительного анализа с расчетными значениями ГЭД населения от проектных и прогнозных фактических жидких сбросов БелАЭС после

Образец цитирования:

Роздяловская ЛФ, Николаенко ЕВ, Гусейнова ДИ, Кляус ВВ. Оценка доз облучения населения от жидких сбросов Белорусской АЭС в режиме нормальной эксплуатации. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;4:46–56.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-46-56>

For citation:

Rozdylouskaya LF, Nikalayenka AU, Huseinava DI, Kliaus VV. Assessment of population exposure dose resulted from liquid discharges of Belarusian NPP in normal operation mode. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;4:46–56. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-46-56>

Авторы:

Лариса Федоровна Роздяловская – старший научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности.
Елена Владимировна Николаенко – кандидат медицинских наук; заведующий лаборатории радиационной безопасности.
Диана Ивановна Гусейнова – специалист лаборатории радиационной безопасности.
Виктория Вячеславовна Кляус – кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности.

Authors:

Larisa F. Rozdylouskaya, senior researcher at the laboratory of radiation safety.
LRozdylouskaya@gmail.com
Alena U. Nikalayenka, PhD (medicine); head of the laboratory of radiation safety.
zav_radsafety@rspch.by
Dziyana I. Huseinava, specialist at the laboratory of radiation safety.
dianahuseinava@gmail.com
Viktoryia V. Kliaus, PhD (biology); leading researcher at the laboratory of radiation safety.
vkliaus@gmail.com

введения станции в эксплуатацию. В качестве модельных параметров для прогнозных оценок использовались данные о фактических жидких сбросах станций-аналогов БелАЭС с реактором ВВЭР-1200. В исследовании представлены результаты оценки и анализа ГЭД от проектных и прогнозных фактических жидких сбросов БелАЭС по всем путям облучения. Показано, что прогнозные оценки фактических ГЭД населения сопоставимы с проектными ГЭД от сбросов БелАЭС в р. Вилия и составляют не более 22 % от соответствующего норматива ГД. Оставшийся резерв 78 % достаточен, чтобы надежно обеспечить соблюдение норматива ГД облучения населения от жидких радиоактивных сбросов БелАЭС, в том числе после ввода в эксплуатацию второго энергетического блока. Не менее 80 % ГЭД населения от жидких сбросов БелАЭС в р. Вилия будет формироваться за счет внутреннего облучения, в значительной мере от потребления выловленной в реке рыбы. Внешнее облучение населения от жидких сбросов БелАЭС происходит при пребывании на пляже, его вклад в общую ГЭД от сбросов не превышает 20 %. Определен перечень основных дозобразующих радионуклидов и обоснована необходимость обязательного контроля в сбросных водах БелАЭС объемной концентрации радионуклидов ^{131}I , ^{60}Co , ^{58}Co , ^{54}Mn , ^{90}Sr .

Ключевые слова: атомная электростанция; станция-аналог БелАЭС; жидкие сбросы; доза облучения населения; граничная доза.

ASSESSMENT OF POPULATION EXPOSURE DOSE RESULTED FROM LIQUID DISCHARGES OF BELARUSIAN NPP IN NORMAL OPERATION MODE

L. F. ROZDYALOUSKAYA^a, A. U. NIKALAYENKA^a, D. I. HUSEINAVA^a, V. V. KLIAUS^a

^aScientific Practical Centre of Hygiene,

8 Akademičnaja Street, Minsk 220012, Belarus

Corresponding author: L. F. Rozdylouskaya (L.Rozdylouskaya@gmail.com)

Radiation safety of the population from liquid discharges of the Belarusian NPP (hereinafter – BelNPP) into surface water bodies is considered to be ensured if the exposure dose to the population due to the discharges does not exceed the value of the Dose Constraint (hereinafter – DC) established by the sanitary norms and rules for ensuring radiation safety: 50 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. If there are prerequisites for the possibility of reducing the specified DC standard, it can be revised by decision of the state sanitary supervision institutions based on estimates of annual effective doses to the population (hereinafter – referred to as YED) for a certain period of NPP operation. The purpose of the study was to consider the rightfulness of the established value of the DC standard by comparing it with the calculated values of the YED of the population from the design and predictive actual liquid discharges of the BelNPP after the commissioning of the plant. As model parameters for predictive estimates, data on actual liquid discharges from NPP – analogues of the BelNPP with a VVER-1200 reactor were used. The article presents the results of the assessment and analysis of the YED from the design and predictive actual liquid discharges of the BelNPP through all exposure pathways. It is shown that the predictive estimates of the actual YED of the population are comparable with the design YED from BelNPP discharges into the Viliya River and do not exceed 22 % of the corresponding DC standard. The remaining reserve of 78 % is sufficient to reliably ensure compliance with the DC standard for public exposure from liquid radioactive discharges of the BelNPP, including after the commissioning of the second power unit. At least 80 % of the YED of the population from liquid discharges of the BelNPP into the Viliya River will be formed due to internal irradiation, to a large extent from the consumption of fish caught in the river. External exposure of the population from liquid discharges of the BelNPP occurs mainly when staying on the beach, its contribution to the total YED from discharges does not exceed 20 %. The list of the main dose-forming radionuclides was determined and the necessity of mandatory control of the volumetric concentration of radionuclides ^{131}I , ^{60}Co , ^{58}Co , ^{54}Mn , ^{90}Sr in waste waters of the BelNPP was substantiated.

Keywords: nuclear power plant; the plant-analog of the BelNPP; liquid discharges; exposure dose to the population; dose constraint.

Введение

Производство энергии существенно влияет на состояние окружающей среды и может отразиться на здоровье населения, проживающего вблизи энергетического объекта. Атомные электростанции (далее – АЭС) не выбрасывают в атмосферу летучей золы или ядовитых газов, как электростанции, работающие на ископаемом топливе, но жидкие радиоактивные сбросы от АЭС в поверхностные водоемы и их газо-аэрозольные выбросы в атмосферу являются постоянным поводом для беспокойства общественности, несмотря на строгие меры, применяемые к их регламентированию и контролю [1].

Радиационная безопасность населения считается обеспеченной, если дозы облучения населения и концентрации радиоактивных веществ в окружающей среде не превышают предельных нормативных

значений, установленных в гигиенических нормативах и санитарных нормах и правилах по радиационной безопасности^{1, 2, 3}. Кроме предела индивидуальной дозы облучения лиц из населения от всех техногенных источников (1 мЗв/год), современная система защиты требует установления оптимизированного норматива граничной дозы (далее – ГД) для каждого отдельного радиационного объекта, что обеспечивает невышшение предела дозы облучения населения от всех источников ионизирующего излучения [2].

В применении к БелАЭС граничная доза для населения – заблаговременно введенное ограничение индивидуальной дозы облучения репрезентативного лица из населения от воздействия радиоактивных выбросов и сбросов АЭС, обеспечивающее базовый уровень защиты и определяющее максимальную индивидуальную годовую эффективную дозу, которую население (репрезентативное лицо) может получить в результате нормальной эксплуатации станции [3].

Значение ГД населения для БелАЭС установлено санитарными нормами и правилами по обеспечению радиационной безопасности: 50 мкЗв/год за счет радиоактивных выбросов в атмосферу и 50 мкЗв/год за счет жидких сбросов в поверхностные водоемы. Это значение может быть пересмотрено по решению учреждений государственного санитарного надзора на основании оценок радиологического воздействия БелАЭС на население при наличии предпосылок к возможности его снижения с учетом анализа годовых эффективных доз облучения населения (ГЭД) за определенный период эксплуатации⁴.

Предварительное рассмотрение установленных нормативов ГД в аспекте их обоснованности и оптимизации проводится на основании анализа ГЭД, рассчитанных по проектным поступлениям радиоактивных веществ в окружающую среду, в сравнении с оценками ГЭД на основе активностей и структуры фактических радиоактивных выбросов и сбросов при нормальной эксплуатации БелАЭС и станций-аналогов БелАЭС [8].

Цель исследования – провести сравнительный анализ установленного норматива ГД и расчетных значений ГЭД населения от проектных и прогнозных фактических жидких сбросов БелАЭС, используя в качестве модельных параметров проектные данные БелАЭС и данные о фактических жидких сбросах станций-аналогов БелАЭС с реактором ВВЭР-1200.

Материалы и методы исследования

Инструментальные методы не позволяют выделить долю дозы облучения населения от нормальной эксплуатации АЭС из общей дозы облучения населения, складывающейся из дозы облучения от АЭС и дозы от техногенного фона, обусловленного радионуклидами глобального и чернобыльского выпадений. Поэтому для оценки доз облучения населения от сбросов при эксплуатации АЭС применяются расчетные методы и математические модели, учитывающие активность радионуклидов в сбросах АЭС в окружающую среду; данные о метеоусловиях площадки, гидрологические характеристики водоема для осуществления сбросов и модельные параметры репрезентативного лица в зоне наблюдения АЭС.

В настоящей работе в качестве исходных параметров для расчета ГЭД населения от жидких сбросов БелАЭС использованы:

- проектные активности радионуклидов в жидких сбросах БелАЭС;
- фактические активности радионуклидов в сбросах станций-аналогов БелАЭС – Ленинградской (ЛАЭС-2) и Нововоронежской АЭС (НВАЭС-2);
- гидрологические характеристики водоема, в который поступают жидкие сбросы от БелАЭС – р. Вилия);
- параметры репрезентативного лица населения, проживающего в зоне наблюдения БелАЭС, полученные в результате опроса населения государственным предприятием НППГ в Островецком р-не в 2017–2018 гг.

Фактические данные по активностям сбросов станций-аналогов БелАЭС использованы в расчетах прогнозной оценки ГЭД от ее фактических сбросов, поскольку соответствующие данные для БелАЭС на настоящий момент не наработаны, а указанные станции конструкционно являются полными аналогами.

¹Требования к радиационной безопасности: санитарные нормы и правила: утверждено постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 28 декабря 2012 г. № 213 // Радиационная гигиена: сборник нормативных документов. Минск: РЦГЭиОЗ, 2013. С. 6–34.

²Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации атомных электростанций: санитар. нормы, правила и гигиен. нормативы: утверждено постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 31 марта 2010 г. № 39. Минск: РЦГЭиОЗ, 2010. 115 с.

³Гигиенический норматив. Критерии оценки радиационного воздействия: утверждено постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь, 28 декабря 2012 г., № 213. Радиационная гигиена: сборник нормативных документов. Минск: РЦГЭиОЗ, 2013. С. 35–167.

⁴О порядке установления и применения граничных доз облучения и референтных уровнях: приказ Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31.08.2020 № 881.

Оценка ГЭД репрезентативного лица выполнена согласно российской методике^{5, 6}, которая позволяет оценить дозу от каждого радионуклида по всем путям внешнего и внутреннего облучения и предполагает, что расчеты будут соответствовать следующим условиям:

- 1) проживание в ближайшем населенном пункте от точки сброса радиоактивных веществ БелАЭС;
- 2) осуществление хозяйственной деятельности, в том числе рекреационной (лов рыбы, купание и т. д.);
- 3) потребление в пищу рыбы и продуктов питания местного производства из личного подсобного хозяйства;
- 4) потребление растениеводческой продукции, выращенной с учетом полива водой из р. Вилия;
- 5) потребление животноводческой продукции, произведенной с учетом водопоя скота водой из р. Вилия и выпаса скота на пастбищах, расположенных на орошаемых землях;
- 6) использование речной воды в качестве питьевой.

Пути облучения населения определялись в соответствии с международными рекомендациями (МАГАТЭ, НКДАР ООН) на основе анализа водопользования, образа жизни и привычек местного населения в районе расположения АЭС. Учитывались:

- 1) внешнее облучение от пребывания на берегу;
- 2) внутреннее облучение от потребления пресноводной рыбы;
- 3) внешнее облучение от купания;
- 4) внешнее облучение от плавания (рыбалка) на лодке;
- 5) внешнее облучение от пребывания на пляже;
- 6) внешнее облучение от пребывания на орошаемых территориях;
- 7) внутреннее облучение от потребления питьевой воды;
- 8) внутреннее облучение от потребления овощей;
- 9) внутреннее облучение от потребления молока и мяса, загрязненных радионуклидами в результате водопоя скота;
- 10) внутреннее облучение от потребления молока и мяса, загрязненных радионуклидами в результате выпаса скота;
- 11) внутреннее облучение от заглатывания при купании речной воды, загрязненной радионуклидами.

ГЭД облучения от поступающего в реку ³H рассчитывалась отдельно⁷, учитывая возможные пути внешнего и внутреннего облучения этим радионуклидом (ингаляционный, пероральный, через кожные покровы) без детализации по путям облучения.

Расчеты ГЭД облучения репрезентативного лица проводились для типового участка реки, обеспечивающего соблюдение условий однородности потока, на котором осуществляется водопользование, приводящее к облучению лиц из населения (критический участок), на расстоянии 1500 м от точки сброса.

Для расчетов ГЭД использовались активности радионуклидов в жидких сбросах согласно проектным данным БелАЭС и данным о фактических сбросах ЛАЭС-2 и НВАЭС-2 в 2019 г., представленных в табл. 1. Использование в расчетах фактических активностей сбросов станций-аналогов в сочетании с гидро-метеорологическими условиями площадки БелАЭС и параметрами репрезентативного лица, проживающего в зоне наблюдения БелАЭС, позволяет предположительно рассматривать полученные результаты (расчетные ГЭД) как прогнозные значения ГЭД населения от фактических жидких сбросов БелАЭС.

В связи с тем, что оценка ГЭД населения от сбросов радионуклидов АЭС проводилась с использованием расчетного метода математического моделирования с использованием фактических и проектных данных о величине сброса радионуклидов, оценка неопределенности полученных значений ГЭД не проводилась.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты оценки ГЭД на основе проектных и фактических активностей радионуклидов в сбросах БелАЭС и станций-аналогов БелАЭС представлены в табл. 2. Их анализ, в сравнении с данными по структуре сбросов АЭС в табл. 1, позволяет сделать три важных вывода:

⁵РБ-126-17. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) 25.07.2017 г. № 281. Москва: Ростехнадзор, 2017. 33 с.

⁶РБ-121-16. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации к структуре и содержанию технологического регламента эксплуатации блока АЭС с реактором типа ВВЭР: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) 14.12.2016 г. № 533. Москва: Ростехнадзор, 2016. 95 с.

⁷РБ-126-17. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) 25.07.2017 г. № 281. Москва: Ростехнадзор, 2017. 33 с.

1. Более 99 % активности сбросных вод станций-аналогов БелАЭС с реактором ВВЭР-1200 обусловлено присутствием ^3H , попадающего в сбросы из реакторной воды вследствие нарушения герметичности твэлов и стержней регулирования.

2. Годовой проектный сброс БелАЭС в основном сопоставим с фактическими сбросами энергоблоков ЛАЭС-2 и НВАЭС-2, за исключением концентрации ^{90}Sr , активность которого в проектном сбросе БелАЭС на 4–5 порядков ниже, чем фактическая величина активности этого радионуклида в сбросах станций аналогов (табл. 1).

3. Вклад радионуклида ^{90}Sr в общую ГЭД, рассчитанную по фактическим данным сбросов ЛАЭС-2 и НВАЭС-2, составляет около 40 %, а при расчетах ГЭД от проектных сбросов – менее 0,1 % (табл. 2, рис. 1).

Таблица 1

Проектные жидкие радиоактивные сбросы БелАЭС и фактические радиоактивные жидкие сбросы станций-аналогов БелАЭС – ЛАЭС-2 и НВАЭС-2

Table 1

Design liquid radioactive discharges of BelNPP and actual radioactive liquid discharges of BelNPP analogous stations - LNPP-2 and NVNPP-2

Радионуклид	БелАЭС (проект)		ЛАЭС-2(по факту)		НВАЭС-2 (по факту)	
	годовой сброс, Бк/год	% от суммарного сброса	годовой сброс, Бк/год	% от суммарного сброса	годовой сброс, Бк/год	% от суммарного сброса
^3H	$1,10 \times 10^{13}$	99,9	$8,75 \times 10^{12}$	99,9777	$4,8 \times 10^{12}$	99,7954
^{60}Co	$1,99 \times 10^6$	>0,0001	$4,40 \times 10^7$	0,0005	$1,1 \times 10^8$	0,0029
^{131}I	$9,56 \times 10^6$	>0,0001	$5,61 \times 10^7$	0,0006	$7,2 \times 10^7$	0,0015
^{134}Cs	$1,3 \times 10^8$	>0,0001	$2,46 \times 10^7$	0,0003	$7,5 \times 10^7$	0,0016
^{137}Cs	$2,04 \times 10^8$	>0,0001	$2,81 \times 10^7$	0,0003	$8,4 \times 10^7$	0,0017
^{51}Cr	$2,86 \times 10^6$	>0,0001	$1,65 \times 10^8$	0,0019	$6,1 \times 10^8$	0,0127
^{54}Mn	$2,72 \times 10^5$	>0,0001	$6,29 \times 10^7$	0,0007	$9,7 \times 10^7$	0,0020
^{59}Fe	$1,067 \times 10^6$	>0,0001	$4,79 \times 10^7$	0,0005	$1,4 \times 10^8$	0,0029
^{58}Co	$4,05 \times 10^6$	>0,0001	$6,36 \times 10^7$	0,0007	$7,9 \times 10^8$	0,0164
^{65}Zn	$3,073 \times 10^6$	>0,0001	$6,74 \times 10^7$	0,0008	$1,7 \times 10^7$	0,0004
^{89}Sr	$1,353 \times 10^7$	>0,0001	$4,25 \times 10^8$	0,0049	$3,4 \times 10^9$	0,0707
^{90}Sr	$3,830 \times 10^4$	>0,0001	$3,09 \times 10^8$	0,0035	$3,4 \times 10^9$	0,0707
^{95}Zr	$3,073 \times 10^6$	>0,0001	$6,61 \times 10^7$	0,0008	$1,3 \times 10^8$	0,0027
^{103}Ru	–	–	$2,74 \times 10^7$	0,0003	$6,8 \times 10^7$	0,0014
^{106}Ru	–	–	$1,40 \times 10^8$	0,0016	$2,4 \times 10^8$	0,0050
^{141}Ce	–	–	$4,31 \times 10^7$	0,0005	$1,1 \times 10^8$	0,0029
^{144}Ce	$1,7 \times 10^5$	>0,0001	$1,60 \times 10^8$	0,0018	$5,0 \times 10^8$	0,0104
^{95}Nb	$1,472 \times 10^6$	>0,0001	–	–	–	–

Таблица 2

ГЭД населения от проектных и прогнозных фактических сбросов БелАЭС

Table 2

AED of the population from the design and predictive actual discharges of the BelNPP

Радионуклид	Проект		Прогноз на основе данных по ЛАЭС-2		Прогноз на основе данных по НВАЭС-2	
	ГЭД, мкЗв	вклад в ГЭД, %	ГЭД, мкЗв	вклад в ГЭД, %	ГЭД, мкЗв	вклад в ГЭД, %
^3H	1,78	17,9	1,41	37,5	0,78	6,9
^{131}I	$2,10 \times 10^{-2}$	0,2	$1,24 \times 10^{-1}$	3,3	$1,59 \times 10^{-1}$	1,4
^{60}Co	$1,01 \times 10^{-2}$	0,2	$2,24 \times 10^{-1}$	6,0	$5,60 \times 10^{-1}$	5,0
^{58}Co	$2,58 \times 10^{-3}$	<0,01	$4,06 \times 10^{-2}$	1,1	$5,04 \times 10^{-1}$	4,5
^{89}Sr	$1,11 \times 10^{-3}$	<0,01	$3,47 \times 10^{-2}$	0,9	$2,78 \times 10^{-1}$	2,5
^{59}Fe	$8,24 \times 10^{-4}$	<0,01	$3,70 \times 10^{-2}$	1,0	$1,08 \times 10^{-1}$	0,9
^{54}Mn	$5,90 \times 10^{-4}$	<0,01	$1,36 \times 10^{-1}$	3,6	$3,04 \times 10^{-1}$	2,7
^{95}Zr	$1,81 \times 10^{-4}$	<0,01	–	–	$7,66 \times 10^{-3}$	0,1

Радионуклид	Проект		Прогноз на основе данных по ЛАЭС-2		Прогноз на основе данных по НВАЭС-2	
	ГЭД, мкЗв	вклад в ГЭД, %	ГЭД, мкЗв	вклад в ГЭД, %	ГЭД, мкЗв	вклад в ГЭД, %
^{90}Sr	$5,13 \times 10^{-5}$	<0,01	$4,14 \times 10^{-1}$	11,0	4,55	40,3
^{95}Nb	$4,94 \times 10^{-5}$	<0,01	—	—	—	—
^{141}Ce	$2,37 \times 10^{-5}$	<0,01	$6,02 \times 10^{-3}$	0,2	$1,54 \times 10^{-2}$	0,1
^{51}Cr	$2,11 \times 10^{-5}$	<0,01	$1,22 \times 10^{-3}$	<0,01	$4,50 \times 10^{-5}$	<0,01
Сумма	9,97	100,0	3,76	100,0	11,3	100,0

В перечень основных дозообразующих радионуклидов, кроме ^3H , в соответствии с расчетами на основе проектных сбросов, входят ^{137}Cs и ^{134}Cs (суммарный вклад в ГЭД более 99 %), в то время как аналогичный перечень, полученный на основе прогнозных данных (сбросы станций-аналогов), содержит ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{60}Co , ^{58}Co , ^{54}Mn , ^{90}Sr . Из этого следует, что при оценке ГЭД населения от жидких сбросов БелАЭС в р. Виляя необходимо учитывать не менее семи изотопов, а нормирование активности ^{90}Sr , наряду с активностями ^{134}Cs и ^{137}Cs , в сбросах БелАЭС должно быть обязательным.

Расчеты на основании фактических сбросов станций-аналогов показывают, что, если исключить облучение тритием, то не менее 80 % ГЭД репрезентативного лица формируется за счет внутреннего облучения по пероральному пути от поступления в организм радионуклидов ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{60}Co и ^{90}Sr при потреблении местных продуктов питания. Наибольший вклад в ГЭД от внутреннего облучения вносит потребление рыбы (рис. 2), далее по убывающей идут дозы от потребления воды и потребления мяса (табл. 3–5).

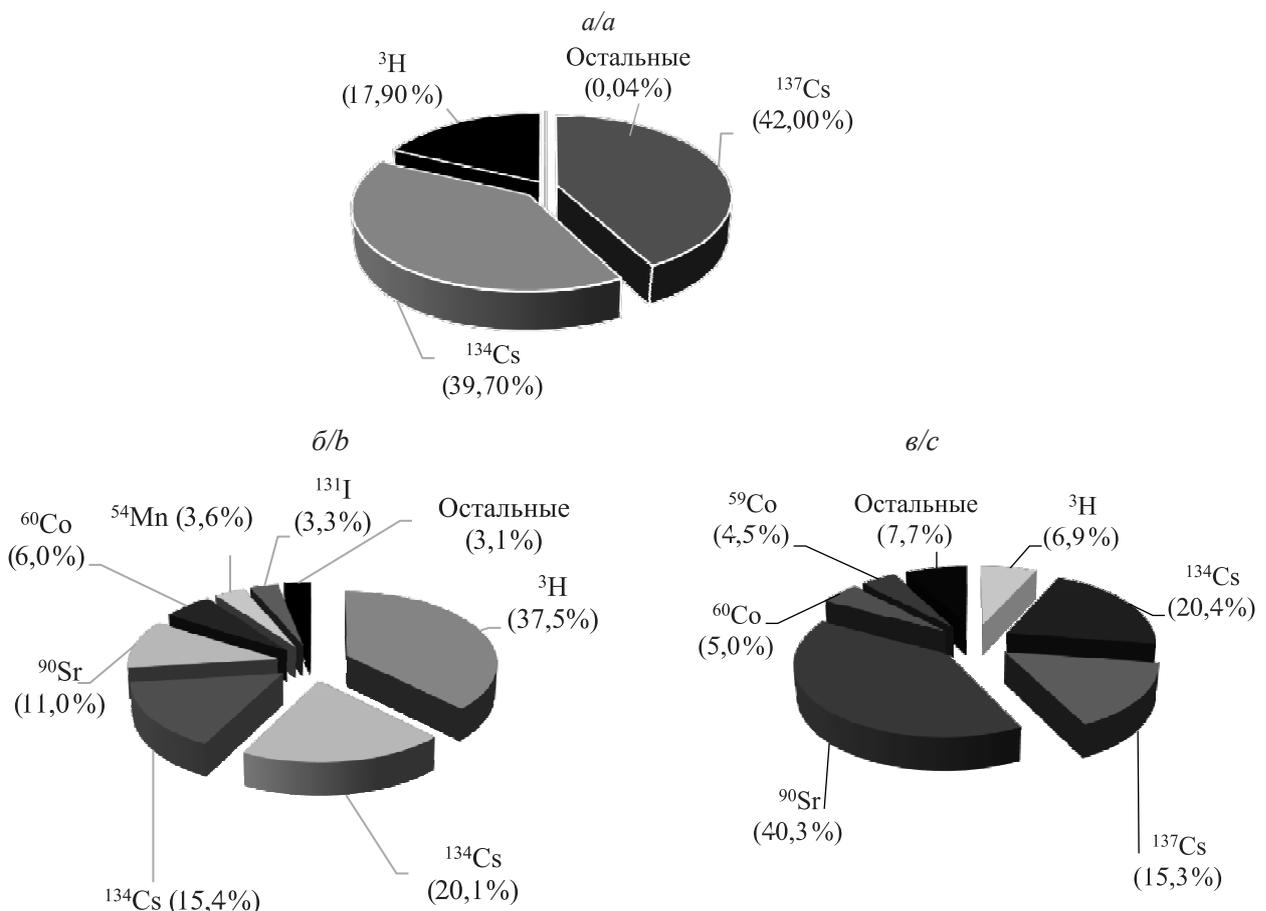


Рис. 1. Вклад отдельных радионуклидов в суммарную ГЭД населения от сбросов БелАЭС при нормальной эксплуатации: а – ГЭД рассчитаны на основе проектных сбросов БелАЭС; б – ГЭД рассчитаны на основе фактических сбросов ЛАЭС-2; в – ГЭД рассчитаны на основе фактических сбросов НВАЭС-2

Fig. 1. The contribution of individual radionuclides to the total AED of the population from BelNPP discharges during normal operation: а – AED are calculated based on the design discharges of the BelNPP; б – AED calculated on the basis of actual discharges from LNPP-2; с – AED calculated based on actual discharges from NVNPP-2

Таблица 3

Table 3

ГЭД населения от сбросов БелАЭС в р. Вилия, рассчитанная на основе проектных сбросов БелАЭС

YED of the public from discharges of the BelNPP into the river Viliya, calculated on the basis of the design discharges of the BelNPP

Радио-нуклид	Внешнее облучение					Внутреннее облучение										общая суммарная доза
	кулаение	рыбалка	пребывание на пляже	пребывание на орошаемой территории	суммарная доза от внешнего облучения	потребление рыбы	потребление овощей	потребление мяса (от водопоя скота)	потребление молока (от доения скота)	потребление молока (от выпаса скота)	потребление мяса (от выпаса скота)	потребление молока (от выпаса скота)	потребление питьевой воды	загрязнение воды при купании	суммарная доза от внутреннего облучения	
¹³⁴ Cs	$1,05 \times 10^{-5}$	$3,11 \times 10^{-5}$	$2,14 \times 10^{-1}$	$1,81 \times 10^{-3}$	$2,16 \times 10^{-1}$	3,73	$7,14 \times 10^{-4}$	$2,44 \times 10^{-3}$	$9,87 \times 10^{-4}$	$2,78 \times 10^{-3}$	$1,03 \times 10^{-3}$	$1,12 \times 10^{-2}$	$7,62 \times 10^{-6}$	3,73	3,95	
¹³⁷ Cs	$6,28 \times 10^{-6}$	$1,86 \times 10^{-5}$	$1,53 \times 10^{-1}$	$1,11 \times 10^{-2}$	$1,64 \times 10^{-1}$	4,00	$1,42 \times 10^{-3}$	$2,67 \times 10^{-3}$	$1,06 \times 10^{-3}$	$6,10 \times 10^{-3}$	$2,21 \times 10^{-3}$	$1,20 \times 10^{-2}$	$8,18 \times 10^{-6}$	4,01	4,17	
⁶⁰ Co	$2,70 \times 10^{-7}$	$8,00 \times 10^{-7}$	$8,52 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-4}$	$8,63 \times 10^{-3}$	$1,21 \times 10^{-3}$	$1,77 \times 10^{-5}$	$3,68 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-5}$	$8,37 \times 10^{-5}$	$2,17 \times 10^{-5}$	$1,19 \times 10^{-4}$	$3,86 \times 10^{-7}$	$1,44 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-2}$	
⁵⁸ Co	$2,06 \times 10^{-7}$	$6,10 \times 10^{-7}$	$2,02 \times 10^{-3}$	$3,31 \times 10^{-6}$	$2,02 \times 10^{-3}$	$4,00 \times 10^{-4}$	$5,26 \times 10^{-6}$	$1,01 \times 10^{-5}$	$3,45 \times 10^{-6}$	$7,85 \times 10^{-5}$	$2,44 \times 10^{-5}$	$3,95 \times 10^{-5}$	$1,28 \times 10^{-7}$	$5,56 \times 10^{-4}$	$2,58 \times 10^{-3}$	
¹³¹ I	$1,85 \times 10^{-7}$	$5,49 \times 10^{-7}$	$2,20 \times 10^{-5}$	$3,49 \times 10^{-7}$	$2,24 \times 10^{-5}$	$1,53 \times 10^{-2}$	$8,36 \times 10^{-7}$	$1,52 \times 10^{-4}$	$3,09 \times 10^{-4}$	$5,17 \times 10^{-4}$	$9,61 \times 10^{-4}$	$3,81 \times 10^{-3}$	$1,24 \times 10^{-5}$	$2,10 \times 10^{-2}$	$2,10 \times 10^{-2}$	
⁸⁸ Sr	$3,75 \times 10^{-9}$	$1,11 \times 10^{-8}$	$9,76 \times 10^{-6}$	$5,84 \times 10^{-7}$	$1,61 \times 10^{-6}$	$2,09 \times 10^{-4}$	$6,36 \times 10^{-5}$	$1,81 \times 10^{-5}$	$1,41 \times 10^{-5}$	$1,46 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-4}$	$5,40 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-6}$	$1,09 \times 10^{-3}$	$1,09 \times 10^{-3}$	
⁹⁰ Sr	$2,00 \times 10^{-11}$	$5,92 \times 10^{-11}$	$3,35 \times 10^{-9}$	$5,78 \times 10^{-9}$	$9,21 \times 10^{-9}$	$5,25 \times 10^{-6}$	$1,12 \times 10^{-5}$	$6,02 \times 10^{-7}$	$3,61 \times 10^{-7}$	$1,32 \times 10^{-5}$	$7,15 \times 10^{-6}$	$1,36 \times 10^{-5}$	$2,20 \times 10^{-8}$	$5,08 \times 10^{-5}$	$5,08 \times 10^{-5}$	
⁹⁵ Zr	$1,18 \times 10^{-7}$	$3,51 \times 10^{-7}$	$2,39 \times 10^{-5}$	$1,73 \times 10^{-6}$	$2,61 \times 10^{-5}$	$1,12 \times 10^{-4}$	$4,88 \times 10^{-6}$	$1,36 \times 10^{-9}$	$2,00 \times 10^{-9}$	$1,06 \times 10^{-8}$	$1,41 \times 10^{-8}$	$3,82 \times 10^{-5}$	$1,24 \times 10^{-7}$	$1,55 \times 10^{-4}$	$1,81 \times 10^{-4}$	
⁹⁵ Nb	$6,66 \times 10^{-8}$	$1,97 \times 10^{-7}$	$6,68 \times 10^{-6}$	$4,69 \times 10^{-7}$	$7,41 \times 10^{-6}$	$3,06 \times 10^{-5}$	$8,40 \times 10^{-7}$	$3,57 \times 10^{-11}$	$3,62 \times 10^{-10}$	$6,89 \times 10^{-10}$	$2,42 \times 10^{-9}$	$1,04 \times 10^{-5}$	$3,39 \times 10^{-8}$	$4,18 \times 10^{-5}$	$4,92 \times 10^{-5}$	
¹⁴¹ Ce	$6,11 \times 10^{-10}$	$1,81 \times 10^{-9}$	$1,52 \times 10^{-5}$	$4,78 \times 10^{-9}$	$1,52 \times 10^{-5}$	$6,41 \times 10^{-6}$	$1,39 \times 10^{-7}$	$1,11 \times 10^{-9}$	$4,98 \times 10^{-9}$	$8,02 \times 10^{-9}$	$3,27 \times 10^{-8}$	$1,92 \times 10^{-6}$	$6,24 \times 10^{-9}$	$8,50 \times 10^{-6}$	$2,37 \times 10^{-5}$	
⁵¹ Cr	$4,56 \times 10^{-9}$	$1,35 \times 10^{-8}$	$8,38 \times 10^{-6}$	$2,94 \times 10^{-8}$	$8,44 \times 10^{-6}$	$7,78 \times 10^{-6}$	$8,03 \times 10^{-8}$	$3,55 \times 10^{-7}$	$2,51 \times 10^{-9}$	$2,96 \times 10^{-6}$	$1,92 \times 10^{-8}$	$1,46 \times 10^{-6}$	$4,73 \times 10^{-9}$	$1,26 \times 10^{-5}$	$2,10 \times 10^{-5}$	
⁵⁴ Mn	$1,19 \times 10^{-8}$	$3,53 \times 10^{-8}$	$5,26 \times 10^{-4}$	$8,38 \times 10^{-7}$	$5,27 \times 10^{-4}$	$5,98 \times 10^{-5}$	$6,59 \times 10^{-6}$	$5,56 \times 10^{-9}$	$4,93 \times 10^{-9}$	$3,18 \times 10^{-8}$	$2,58 \times 10^{-8}$	$1,87 \times 10^{-6}$	$6,07 \times 10^{-9}$	$6,83 \times 10^{-5}$	$5,95 \times 10^{-4}$	
⁵⁹ Fe	$6,88 \times 10^{-8}$	$2,04 \times 10^{-7}$	$4,80 \times 10^{-5}$	$6,53 \times 10^{-7}$	$5,73 \times 10^{-5}$	$6,97 \times 10^{-4}$	$3,30 \times 10^{-6}$	$5,05 \times 10^{-6}$	$8,02 \times 10^{-8}$	$3,86 \times 10^{-5}$	$5,61 \times 10^{-7}$	$3,08 \times 10^{-5}$	$9,98 \times 10^{-8}$	$7,75 \times 10^{-4}$	$6,50 \times 10^{-4}$	
Сумма	$1,77 \times 10^{-5}$	$5,25 \times 10^{-5}$	$3,77 \times 10^{-1}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$3,9 \times 10^{-1}$	7,75	$2,24 \times 10^{-3}$	$5,33 \times 10^{-3}$	$2,39 \times 10^{-3}$	$9,76 \times 10^{-3}$	$4,36 \times 10^{-3}$	$2,78 \times 10^{-2}$	$3,08 \times 10^{-5}$	7,78	8,17	

Таблица 4

Table 4

ГЭД населения от сбросов БелАЭС в р. Вилия, рассчитанная на основе фактических сбросов ЛАЭС-2

YED of the public from discharges of the BelNPP into the river Viliya, calculated on the basis of actual discharges from LNPP-2

Радионуклид	Внешнее облучение						Внутреннее облучение										общая суммарная доза
	купание	рыбалка	пребывание на пляже	пребывание на орошаемой территории	суммарная доза от внешнего облучения	потребление рыбы	потребление овощей	потребление мяса (от водопоя скота)	потребление молока (от водопоя скота)	потребление мяса (от выпаса скота)	потребление молока (от выпаса скота)	потребление молока (от выпаса скота)	потребление питьевой воды	загрязнение воды при купании	суммарная доза от внутреннего облучения		
¹³⁴ Cs	$1,99 \times 10^{-6}$	$5,89 \times 10^{-6}$	$4,04 \times 10^{-2}$	$3,42 \times 10^{-3}$	$4,38 \times 10^{-2}$	$7,06 \times 10^{-1}$	$1,35 \times 10^{-4}$	$4,61 \times 10^{-4}$	$1,87 \times 10^{-4}$	$5,27 \times 10^{-4}$	$1,94 \times 10^{-4}$	$2,12 \times 10^{-3}$	$1,44 \times 10^{-6}$	$7,08 \times 10^{-1}$	$7,52 \times 10^{-1}$		
¹³⁷ Cs	$8,65 \times 10^{-7}$	$2,65 \times 10^{-6}$	$2,10 \times 10^{-2}$	$1,53 \times 10^{-3}$	$2,25 \times 10^{-2}$	$5,52 \times 10^{-1}$	$1,96 \times 10^{-4}$	$3,67 \times 10^{-4}$	$1,46 \times 10^{-4}$	$8,40 \times 10^{-4}$	$3,04 \times 10^{-4}$	$1,66 \times 10^{-3}$	$1,13 \times 10^{-6}$	$5,54 \times 10^{-1}$	$5,77 \times 10^{-1}$		
⁶⁰ Co	$5,97 \times 10^{-6}$	$1,77 \times 10^{-5}$	$1,88 \times 10^{-2}$	$2,44 \times 10^{-3}$	$2,12 \times 10^{-2}$	$2,67 \times 10^{-2}$	$3,92 \times 10^{-4}$	$8,13 \times 10^{-4}$	$2,33 \times 10^{-4}$	$1,85 \times 10^{-3}$	$4,80 \times 10^{-4}$	$2,63 \times 10^{-3}$	$8,55 \times 10^{-6}$	$3,14 \times 10^{-2}$	$5,26 \times 10^{-2}$		
¹³¹ I	$1,09 \times 10^{-6}$	$3,22 \times 10^{-6}$	$1,29 \times 10^{-4}$	$2,05 \times 10^{-6}$	$1,35 \times 10^{-4}$	$8,95 \times 10^{-2}$	$4,90 \times 10^{-6}$	$8,90 \times 10^{-4}$	$1,82 \times 10^{-3}$	$3,03 \times 10^{-3}$	$5,64 \times 10^{-3}$	$2,24 \times 10^{-2}$	$7,26 \times 10^{-5}$	$1,22 \times 10^{-1}$	$1,22 \times 10^{-1}$		
⁸⁹ Sr	$1,18 \times 10^{-7}$	$3,49 \times 10^{-7}$	$3,07 \times 10^{-4}$	$1,83 \times 10^{-5}$	$3,25 \times 10^{-4}$	$6,56 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-3}$	$5,69 \times 10^{-4}$	$4,42 \times 10^{-4}$	$4,59 \times 10^{-3}$	$3,25 \times 10^{-3}$	$1,70 \times 10^{-2}$	$5,50 \times 10^{-5}$	$3,34 \times 10^{-2}$	$3,37 \times 10^{-2}$		
⁹⁰ Sr	$1,61 \times 10^{-7}$	$4,77 \times 10^{-7}$	$2,71 \times 10^{-5}$	$4,66 \times 10^{-5}$	$7,43 \times 10^{-5}$	$4,24 \times 10^{-8}$	$9,00 \times 10^{-2}$	$4,86 \times 10^{-3}$	$2,91 \times 10^{-3}$	$1,06 \times 10^{-1}$	$5,77 \times 10^{-2}$	$1,10 \times 10^{-1}$	$1,78 \times 10^{-4}$	$3,71 \times 10^{-1}$	$3,71 \times 10^{-1}$		
⁹⁵ Zr	$2,55 \times 10^{-6}$	$7,54 \times 10^{-6}$	$5,14 \times 10^{-4}$	$3,71 \times 10^{-5}$	$5,61 \times 10^{-4}$	$2,41 \times 10^{-9}$	$1,05 \times 10^{-4}$	$2,93 \times 10^{-8}$	$4,31 \times 10^{-8}$	$2,28 \times 10^{-7}$	$3,04 \times 10^{-7}$	$8,21 \times 10^{-4}$	$2,66 \times 10^{-6}$	$9,29 \times 10^{-4}$	$1,49 \times 10^{-3}$		
¹⁴¹ Ce	$1,55 \times 10^{-7}$	$4,59 \times 10^{-7}$	$3,86 \times 10^{-3}$	$1,21 \times 10^{-6}$	$3,86 \times 10^{-3}$	$1,62 \times 10^{-9}$	$3,52 \times 10^{-5}$	$2,82 \times 10^{-7}$	$1,26 \times 10^{-6}$	$2,03 \times 10^{-6}$	$8,30 \times 10^{-6}$	$4,87 \times 10^{-4}$	$1,58 \times 10^{-6}$	$5,35 \times 10^{-4}$	$4,40 \times 10^{-3}$		
⁵¹ Cr	$2,63 \times 10^{-7}$	$7,80 \times 10^{-7}$	$4,84 \times 10^{-4}$	$1,70 \times 10^{-6}$	$4,85 \times 10^{-4}$	$4,49 \times 10^{-10}$	$4,63 \times 10^{-6}$	$2,05 \times 10^{-5}$	$1,45 \times 10^{-7}$	$1,71 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-6}$	$8,41 \times 10^{-5}$	$2,73 \times 10^{-7}$	$2,81 \times 10^{-4}$	$7,66 \times 10^{-4}$		
⁵⁴ Mn	$2,76 \times 10^{-6}$	$8,17 \times 10^{-6}$	$1,22 \times 10^{-1}$	$1,94 \times 10^{-4}$	$1,22 \times 10^{-1}$	$1,38 \times 10^{-8}$	$1,52 \times 10^{-4}$	$1,29 \times 10^{-6}$	$1,14 \times 10^{-6}$	$7,34 \times 10^{-6}$	$5,96 \times 10^{-6}$	$4,32 \times 10^{-4}$	$1,40 \times 10^{-6}$	$6,01 \times 10^{-4}$	$1,22 \times 10^{-1}$		
⁵⁹ Fe	$3,09 \times 10^{-6}$	$9,15 \times 10^{-6}$	$2,16 \times 10^{-3}$	$2,93 \times 10^{-5}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$3,13 \times 10^{-8}$	$1,48 \times 10^{-4}$	$2,27 \times 10^{-4}$	$3,60 \times 10^{-6}$	$1,73 \times 10^{-3}$	$2,52 \times 10^{-5}$	$1,38 \times 10^{-3}$	$4,48 \times 10^{-6}$	$3,49 \times 10^{-3}$	$5,68 \times 10^{-3}$		
⁵⁹ Co	$3,23 \times 10^{-6}$	$9,58 \times 10^{-6}$	$3,17 \times 10^{-2}$	$5,20 \times 10^{-5}$	$3,17 \times 10^{-2}$	$6,29 \times 10^{-9}$	$8,26 \times 10^{-5}$	$1,58 \times 10^{-4}$	$5,43 \times 10^{-5}$	$1,23 \times 10^{-3}$	$3,83 \times 10^{-4}$	$6,20 \times 10^{-4}$	$2,01 \times 10^{-6}$	$1,53 \times 10^{-3}$	$4,32 \times 10^{-2}$		
Сумма	$1,77 \times 10^{-6}$	$4,84 \times 10^{-5}$	$4,11 \times 10^{-1}$	$7,77 \times 10^{-3}$	$4,18 \times 10^{-1}$	1,48	$9,33 \times 10^{-2}$	$8,37 \times 10^{-3}$	$5,79 \times 10^{-3}$	$1,20 \times 10^{-1}$	$9,84 \times 10^{-2}$	$1,57 \times 10^{-1}$	$3,29 \times 10^{-4}$	1,95	2,36		

Таблица 5

Table 5

ГЭД населения от сбросов БелАЭС в р. Вилия, рассчитанная на основе фактических сбросов НВАЭС-2

YED of the population from discharges of the BelNPP into the river Viliya, calculated on the basis of actual discharges from NVNPP-2

Радионуклид	Внешнее облучение										Внутреннее облучение									
	купание	рыбалка	пребывание на пляже	пребывание на орошаемой территории	пребывание на орошаемой территории	суммарная доза от внешнего облучения	потребление рыбы	потребление овощей	потребление мяса (от водопоя скота)	потребление молока (от водопоя скота)	потребление мяса (от выпаса скота)	потребление молока (от выпаса скота)	потребление молока (от выпаса скота)	потребление молочной продукции	потребление питьевой воды	загрязнение воды при купании	суммарная доза от внутреннего облучения	общая суммарная доза		
¹³⁴ Cs	6,12 × 10 ⁻⁶	1,81 × 10 ⁻⁵	1,24 × 10 ⁻¹	1,05 × 10 ⁻³	1,05 × 10 ⁻³	1,25 × 10 ⁻¹	2,17	4,16 × 10 ⁻⁴	1,42 × 10 ⁻³	5,75 × 10 ⁻⁴	1,62 × 10 ⁻³	5,98 × 10 ⁻⁴	6,52 × 10 ⁻³	6,52 × 10 ⁻³	4,44 × 10 ⁻⁶	2,18	2,20			
¹³⁷ Cs	2,59 × 10 ⁻⁶	7,66 × 10 ⁻⁶	6,28 × 10 ⁻²	4,57 × 10 ⁻³	4,57 × 10 ⁻³	6,74 × 10 ⁻²	1,65	5,85 × 10 ⁻⁴	1,10 × 10 ⁻³	4,37 × 10 ⁻⁴	2,51 × 10 ⁻³	9,10 × 10 ⁻⁴	4,95 × 10 ⁻³	4,95 × 10 ⁻³	3,37 × 10 ⁻⁶	1,66	1,73			
⁶⁰ Co	1,49 × 10 ⁻⁵	4,42 × 10 ⁻⁵	4,71 × 10 ⁻¹	6,09 × 10 ⁻³	6,09 × 10 ⁻³	4,77 × 10 ⁻¹	6,67 × 10 ⁻²	9,80 × 10 ⁻⁴	2,03 × 10 ⁻³	5,82 × 10 ⁻⁴	4,63 × 10 ⁻³	1,20 × 10 ⁻³	6,58 × 10 ⁻³	6,58 × 10 ⁻³	2,14 × 10 ⁻⁵	8,27 × 10 ⁻²	5,60 × 10 ⁻¹			
¹³¹ I	1,40 × 10 ⁻⁶	4,14 × 10 ⁻⁵	1,65 × 10 ⁻⁴	2,63 × 10 ⁻⁶	2,63 × 10 ⁻⁶	1,74 × 10 ⁻⁴	1,15 × 10 ⁻¹	6,29 × 10 ⁻⁶	1,14 × 10 ⁻³	2,33 × 10 ⁻³	3,89 × 10 ⁻³	7,23 × 10 ⁻³	2,87 × 10 ⁻²	2,87 × 10 ⁻²	9,32 × 10 ⁻⁵	1,58 × 10 ⁻¹	1,58 × 10 ⁻¹			
⁸⁹ Sr	9,43 × 10 ⁻⁷	2,79 × 10 ⁻⁶	2,45 × 10 ⁻³	1,47 × 10 ⁻⁴	1,47 × 10 ⁻⁴	2,60 × 10 ⁻³	5,25 × 10 ⁻²	1,60 × 10 ⁻²	4,55 × 10 ⁻²	3,54 × 10 ⁻³	3,68 × 10 ⁻²	2,60 × 10 ⁻²	1,36 × 10 ⁻¹	1,36 × 10 ⁻¹	4,40 × 10 ⁻⁴	2,75 × 10 ⁻¹	2,77 × 10 ⁻¹			
⁹⁰ Sr	1,77 × 10 ⁻⁶	5,25 × 10 ⁻⁶	2,98 × 10 ⁻⁴	5,13 × 10 ⁻⁴	5,13 × 10 ⁻⁴	8,18 × 10 ⁻⁴	4,66 × 10 ⁻¹	9,90 × 10 ⁻¹	5,34 × 10 ⁻²	3,20 × 10 ⁻²	1,17	6,35 × 10 ⁻¹	1,21	1,21	1,96 × 10 ⁻³	4,55	4,55			
⁹⁵ Zr	5,01 × 10 ⁻⁶	1,48 × 10 ⁻⁵	1,01 × 10 ⁻³	7,30 × 10 ⁻⁵	7,30 × 10 ⁻⁵	1,10 × 10 ⁻³	4,73 × 10 ⁻³	2,06 × 10 ⁻⁴	5,77 × 10 ⁻⁸	8,47 × 10 ⁻⁸	4,48 × 10 ⁻⁷	5,99 × 10 ⁻⁷	1,61 × 10 ⁻³	1,61 × 10 ⁻³	5,24 × 10 ⁻⁶	6,56 × 10 ⁻³	7,66 × 10 ⁻³			
¹⁴¹ Ce	3,95 × 10 ⁻⁷	1,71 × 10 ⁻⁶	9,85 × 10 ⁻³	3,09 × 10 ⁻⁶	3,09 × 10 ⁻⁶	9,85 × 10 ⁻³	4,14 × 10 ⁻³	8,98 × 10 ⁻⁵	7,21 × 10 ⁻⁷	3,23 × 10 ⁻⁶	5,19 × 10 ⁻⁶	2,12 × 10 ⁻⁵	1,24 × 10 ⁻³	1,24 × 10 ⁻³	4,04 × 10 ⁻⁶	5,51 × 10 ⁻³	1,54 × 10 ⁻²			
⁵¹ Cr	9,73 × 10 ⁻⁷	2,88 × 10 ⁻⁶	1,79 × 10 ⁻³	6,28 × 10 ⁻⁶	6,28 × 10 ⁻⁶	1,80 × 10 ⁻³	1,66 × 10 ⁻³	1,71 × 10 ⁻⁵	7,56 × 10 ⁻⁵	5,35 × 10 ⁻⁷	6,32 × 10 ⁻⁴	4,10 × 10 ⁻⁶	3,11 × 10 ⁻⁶	3,11 × 10 ⁻⁶	1,01 × 10 ⁻⁶	2,70 × 10 ⁻³	4,50 × 10 ⁻³			
⁵⁴ Mn	6,14 × 10 ⁻⁶	1,82 × 10 ⁻⁵	2,71 × 10 ⁻¹	4,31 × 10 ⁻⁴	4,31 × 10 ⁻⁴	2,71 × 10 ⁻¹	3,08 × 10 ⁻²	3,39 × 10 ⁻⁴	2,86 × 10 ⁻⁶	2,54 × 10 ⁻⁶	1,63 × 10 ⁻⁵	1,33 × 10 ⁻⁵	9,62 × 10 ⁻⁴	9,62 × 10 ⁻⁴	3,12 × 10 ⁻⁶	3,21 × 10 ⁻²	2,03 × 10 ⁻¹			
⁵⁹ Fe	9,02 × 10 ⁻⁶	2,67 × 10 ⁻⁵	6,30 × 10 ⁻³	8,57 × 10 ⁻⁵	8,57 × 10 ⁻⁵	6,43 × 10 ⁻³	9,14 × 10 ⁻²	4,33 × 10 ⁻⁴	6,63 × 10 ⁻⁴	1,05 × 10 ⁻⁵	5,06 × 10 ⁻³	7,36 × 10 ⁻⁵	4,03 × 10 ⁻³	4,03 × 10 ⁻³	1,31 × 10 ⁻⁵	1,02 × 10 ⁻¹	1,08 × 10 ⁻¹			
⁵⁸ Co	4,02 × 10 ⁻⁵	1,19 × 10 ⁻⁴	3,94 × 10 ⁻¹	6,46 × 10 ⁻⁴	6,46 × 10 ⁻⁴	3,94 × 10 ⁻¹	7,81 × 10 ⁻²	1,03 × 10 ⁻³	1,97 × 10 ⁻³	6,74 × 10 ⁻⁴	1,53 × 10 ⁻²	4,76 × 10 ⁻³	7,71 × 10 ⁻³	7,71 × 10 ⁻³	2,50 × 10 ⁻⁵	1,10 × 10 ⁻¹	5,00 × 10 ⁻¹			
Сумма	8,95 × 10 ⁻⁵	2,65 × 10 ⁻⁴	1,34	1,36 × 10 ⁻²	1,36 × 10 ⁻²	1,36	4,73	1,01	6,64 × 10 ⁻²	4,02 × 10 ⁻²	1,24	6,75 × 10 ⁻¹	1,40	1,40	2,57 × 10 ⁻³	9,17	10,53			

Основной вклад в ГЭД от внешнего облучения вносит облучение от пребывания на пляже за счет гамма-излучения изотопов ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{58}Co , ^{60}Co и ^{54}Mn от поверхности воды и присутствия этих изотопов в донных отложениях, а также на берегу в результате загрязнения прибрежной полосы во время разливов (рис. 2).

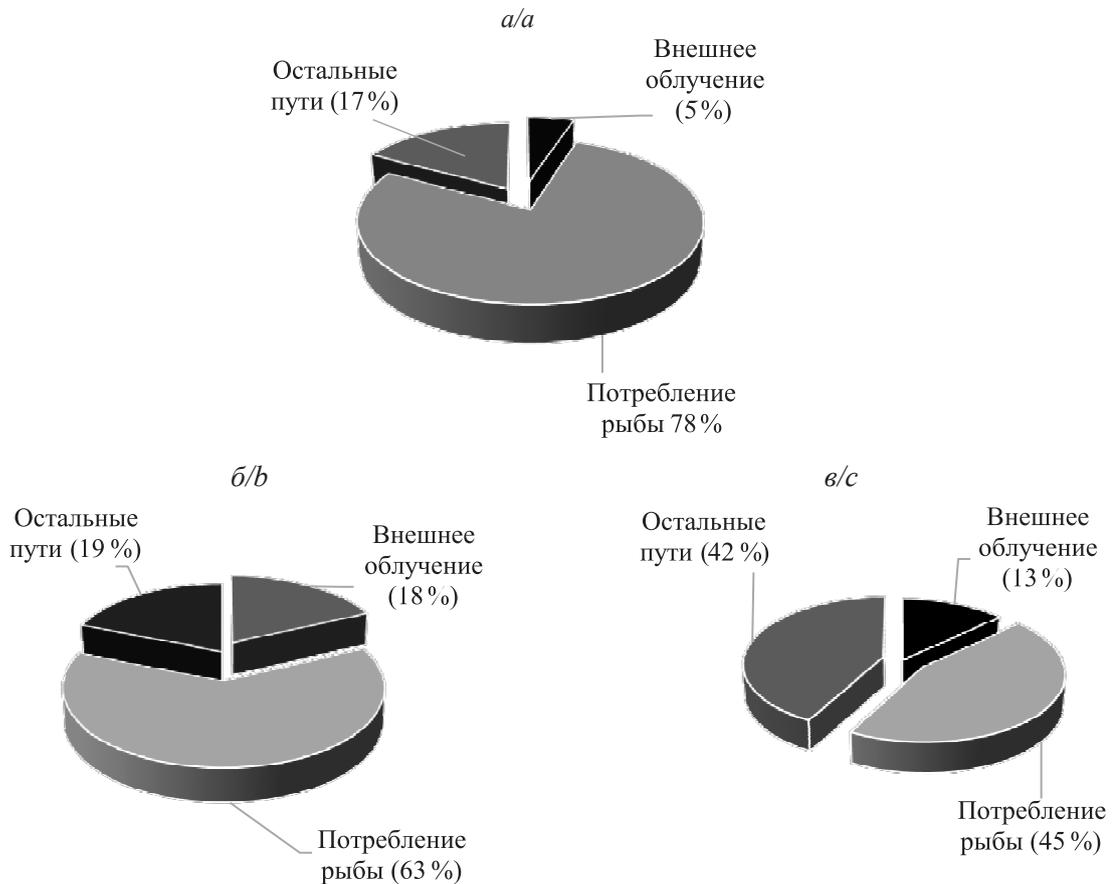


Рис. 2. Вклад различных путей облучения в суммарную ГЭД населения от жидких сбросов БелАЭС: а – ГЭД рассчитаны на основе проектных сбросов энергоблока БелАЭС; б – ГЭД рассчитаны на основе фактических сбросов энергоблока ВВЭР-1200 ЛАЭС-2; в – ГЭД рассчитаны на основе фактических сбросов энергоблока ВВЭР-1200 НВАЭС-2

Fig. 2. Contribution of various exposure pathways to the total public AED from liquid discharges of BelNPP: а – AED calculated on the basis of design discharges of the BelNPP power unit; б – YED calculated on the basis of actual discharges of the VVER-1200 power unit of Leningrad NPP-2; в – AED calculated on the basis of actual discharges of the VVER power unit -1200 NVNPP-2

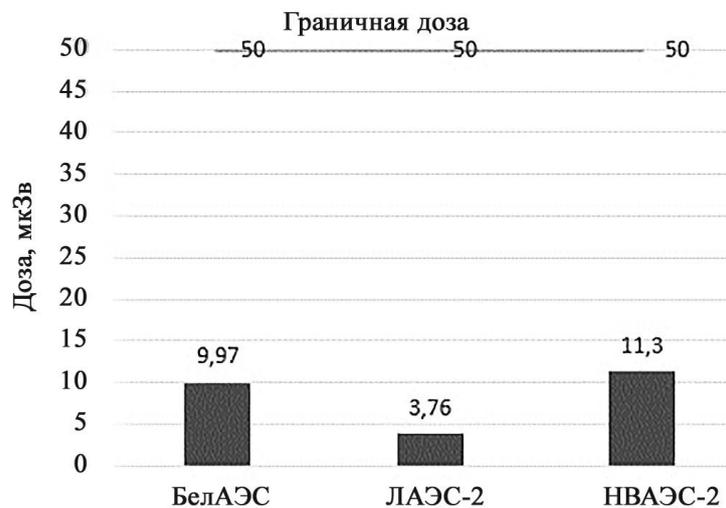


Рис. 3. Сравнение расчетных проектных и прогнозных фактических ГЭД населения при нормальной эксплуатации БелАЭС с нормативным уровнем граничной дозы

Fig. 3. Comparison of calculated design and predicted actual public AED in case of normal operation of the BelNPP with the established level of the dose constraint

Суммарная расчетная ГЭД по всем путям облучения репрезентативного лица от жидких сбросов БелАЭС в р. Виляя, включая дозы от облучения тритием, составила:

- при использовании в расчетах активностей проектных сбросов БелАЭС – 9,97 мкЗв/год;
- при использовании в расчетах активностей фактических сбросов ЛАЭС–2 – 3,76 мкЗв/год;
- при использовании в расчетах активностей фактических сбросов НВАЭС–2 – 11,3 мкЗв/год.

Результаты сопоставимы, и все значения ГЭД значительно ниже установленного норматива граничной дозы (рис. 3). Разность между ГЭД и ГД обеспечивает резерв, характеризующий уровень радиационной безопасности населения от воздействия радиоактивных сбросов БелАЭС в условиях нормальной эксплуатации.

Заключение

В результате выполненных исследований проанализированы дозы облучения населения (репрезентативного лица), прогнозируемые на основе активностей проектных сбросов БелАЭС, в сравнении с прогнозными дозами облучения, рассчитанными на основе фактических сбросов станций-аналогов.

Прогнозные фактические ГЭД населения от сбросов БелАЭС в р. Виляя сопоставимы с проектными и составляют не более 22 % от соответствующего норматива граничной дозы. Оставшийся резерв 78 % достаточен, чтобы обеспечить соблюдение норматива ГД облучения населения от сбросов БелАЭС, в том числе после ввода в эксплуатацию второго энергетического блока.

Не менее 80 % ГЭД населения от жидких сбросов БелАЭС в р. Виляя будет формироваться за счет внутреннего облучения, обусловленного в значительной мере потреблением выловленной в реке рыбы. Внешнее облучение от жидких сбросов происходит при пребывании на пляже, его вклад в общую ГЭД от сбросов не превышает 20 %.

В результате анализа вклада радионуклидов в ГЭД населения от прогнозных фактических сбросов установлена необходимость дополнить перечень основных дозообразующих радионуклидов в жидких сбросах АЭС изотопами ^{131}I , ^{60}Co , ^{58}Co , ^{54}Mn , ^{90}Sr и обеспечить обязательный контроль их содержания в сбросных водах БелАЭС.

Библиографические ссылки

1. Шандала НК, Самойлов АС, Титов АВ, Киселев СМ, Филонова АА и др. Комплексный радиационно-гигиенический мониторинг окружающей среды и здоровья населения в районах размещения АЭС России. В: Орлова МИ, Ежова ЕЕ, редакторы. *Экологическая и радиационная безопасность объектов атомной энергетики*. Калининград: Издательский дом «РОСТ-ДОАФК»; 2017. с. 83–88.
2. Роздяловская ЛФ, Николаенко ЕВ, Сычик СИ. Радиационно-гигиеническое нормирование воздействия радиационных объектов на население и окружающую среду. В: Снежицкий ВА, редактор. *Современные вопросы радиационной и экологической медицины, лучевой диагностики и терапии. Сборник материалов II межвузовской научно-практической интернет-конференции*. Гродно: Гродненский государственный медицинский университет; 2018. с. 178–184.
3. Considerations on the Concept of Dose Constraint. A Report by a Joint Group of Experts from the OECD Nuclear Energy Agency and the European Commission [Internet, cited 25 October 2022]. URL: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/dose.pdf>.
4. Микаилова РА, Нуштаева ВЭ, Спиридонов СИ, Карпенко ЕИ, Кречетников ВВ. Оценка и прогнозирование дозы облучения населения в районе размещения АЭС с ВВЭР-1200. *Атомная энергия*. 2019;127(1):47–50.

References

1. Shandala NK, Samoylov AS, Titov AV, Kiselev SM, Filonova AA et al. *Kompleksnyi radiatsionno-gigienicheskii monitoring okruzhayushchei sredy i zdorov'ya naseleniya v raionakh razmeshcheniya AES Rossii*. [Comprehensive radiation hygienic monitoring of the environment and public health in the areas of the Russian NPP]. V: Orlova MI, Ezhova EE, redaktory. *Ekologicheskaya i radiatsionnaya bezopasnost obiektoy atomnoy energetiki*. Kaliningrad: Izdatelskii dom «ROST-DOAFK»; 2017. p. 83–88. Russian.
2. Rozdyalovskaya LF, Nikolaenko EV, Sychik SI. *Radiatsionno-gigienicheskoe normirovanie vozdeistviya radiatsionnykh ob'ektov na naselenie i okruzhayushchuyu sredu*. [Radiation-hygienic regulation of the impact of radiation objects on the population and the environment]. V: Snezhitskii VA, redaktor. *Sovremennye voprosy radiatsionnoi i ekologicheskoi meditsiny, luchevoi diagnostiki i terapii. Sbornik materialov II mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi internet-konferentsii*. Grodno: Grodnenskiy gosudarstvennyi meditsinskiy universitet; 2018. p. 178–184. Russian.
3. Considerations on the Concept of Dose Constraint. A Report by a Joint Group of Experts from the OECD Nuclear Energy Agency and the European Commission [Internet, cited 2022 October 25]. Available from: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/dose.pdf>.
4. Mikailova RA, Nushtaeva VE, Spiridonov SI, Karpenko EI, Krechetnikov VV. *Otsenka i prognozirovaniye dozy oblucheniya naseleniya v raione razmeshcheniya AES s VVER-1200* [Evaluation and prediction of the exposure dose to the population in the area of NPP with VVER-1200]. *Atomnaya energiya*. 2019;127(1):47–50. Russian.

Статья поступила в редакцию 29.08.2022.
Received by editorial board 29.08.2022.

АКТИВНОСТЬ ОСНОВНЫХ ДОЗОБРАЗУЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДОЕМАХ БЕЛОРУССКОГО СЕКТОРА ЗОНЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И СОЗДАВАЕМЫЕ ИМИ ДОЗОВЫЕ НАГРУЗКИ НА БИОТУ

А. П. ГОЛУБЕВ¹⁾, В. В. ЖУРАВКОВ¹⁾, **В. П. МИРОНОВ**¹⁾, В. Л. ЮХНЕВИЧ²⁾, О. А. БОДИЛОВСКАЯ¹⁾

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

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

В 2014–2015 гг. определяли активность наиболее массовых радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{241}Am в водной толще, донных отложениях и доминирующих видах макрофитов и моллюсков в двух водоемах белорусского сектора ближней зоны ЧАЭС. Из них малопроточное оз. Персток является самым загрязненным радионуклидами водоемом в белорусском секторе зоны ЧАЭС, а сформировавшееся в последние два десятилетия проточное Борщевское затопление характеризуется средним для водоемов ближней зоны ЧАЭС уровнем радиационного загрязнения. По этим данным рассчитаны значения мощности поглощенных доз (МПД) при внутреннем облучении для доминирующих видов биоты водоемов от указанного комплекса радионуклидов. В донных отложениях оз. Персток активность ^{90}Sr и ^{137}Cs достигала 185 и 468 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$, а в Борщевском затоплении – 61 и 212 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ соответственно, что значительно превышает доаварийный уровень этих показателей. Среди организмов биоты наибольшей активностью характеризовались макрофиты. В оз. Персток активность ^{90}Sr и ^{137}Cs у них достигали 24700 и 40100 $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ сухой массы, а в Борщевском затоплении – 8747 и 3780 $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$. У моллюсков оз. Персток наибольшей активностью ^{90}Sr и ^{137}Cs характеризовались раковины беззубки – до 50216 и 1049 $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ живой массы. Активность ^{137}Cs в мягких тканях моллюсков значительно ниже – не более 780 $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ живой массы. Активность ^{241}Am в донных отложениях и макрофитах оз. Персток в период исследований значительно ниже – не более 4,4 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ и 202 $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$, а в Борщевском затоплении – 2,6 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ и 48,1 $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ сухой массы. Активность ^{241}Am в мягких тканях и раковинах моллюсков из обоих водоемов в большинстве случаев не регистрировалась. Суммарные значения МПД от всех исследованных радионуклидов у макрофитов и моллюсков изменялись в пределах 10–28 $\text{мкГр}\cdot\text{сутки}^{-1}$, а у моллюска большого прудовика – 64 $\text{мкГр}\cdot\text{сутки}^{-1}$. Наибольший вклад в формирование общей МПД у макрофитов (в пределах 42–99 %) и моллюсков (до 99 %) вносит изобара $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$. В большинстве случаев вклады изобары $^{137}\text{Cs} + ^{137}\text{Ba}$ и ^{241}Am в суммарные значения МПД крайне незначительны.

Образец цитирования:

Голубев АП, Журавков ВВ, Миронов ВП, Юхневич ВЛ, Бодилловская ОА. Активность основных дозобразующих радионуклидов в водоемах белорусского сектора зоны Чернобыльской атомной электростанции и создаваемые ими дозовые нагрузки на биоту. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;4:57–69.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-57-69>

For citation:

Golubev AP, Zhuravkov VV, Mironov VP, Yukhnevich VL, Bodilovskaya OA. Activity of the main dose-generating radionuclides in water bodies of the belarusian sector of the Chernobyl NPP zone and their dose loads for the biota. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;4:57–69. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-57-69>

Авторы:

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

Владислав Владимирович Журавков – кандидат биологических наук, доцент; заведующий кафедрой информационных технологий в экологии и медицине.

Владислав Петрович Миронов – кандидат химических наук, доцент кафедры ядерной и радиационной безопасности.

Виктория Леонидовна Юхневич – старший специалист.

Ольга Александровна Бодилловская – кандидат биологических наук, 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

Vladislav V. Zhuravkov, PhD (biology), docent; head of the department of information technologies in ecology and medicine.
zhuravkov@iseu.by

Vladislav P. Mironov, PhD (chemistry); associate professor at the department of nuclear and radiation safety.

Victoria L. Yukhnevich, senior specialist.

v.borisenko@mail.ru

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

_olga_iseu@tut.by

Лишь для корней рогоза узколистного их вклад достигал соответственно 37,7 и 20,3 %. В настоящее время в ближней зоне ЧАЭС на фоне снижения активности ^{90}Sr и ^{137}Cs наблюдается рост активности ^{241}Am . Прогнозируется, что к середине XXI в. ^{241}Am станет основным дозообразующим радионуклидом для гидробионтов в водоемах ближней зоны ЧАЭС.

Ключевые слова: ближняя зона ЧАЭС; оз. Персток; Борщевское затопление; ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{241}Am ; вода; донные отложения; макрофиты; моллюски; поглощенные дозы ионизирующей радиации.

ACTIVITY OF THE MAIN DOSE-GENERATING RADIONUCLIDES IN WATER BODIES OF THE BELARUSIAN SECTOR OF THE CHERNOBYL NPP ZONE AND THEIR DOSE LOADS FOR THE BIOTA

A. P. GOLUBEV^a, V. V. ZHURAVKOV^a, V. P. MIRONOV^a, V. L. YUKHNEVICH^b, O. A. BODILOVSKAYA^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Dauhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
^bPolessky State Radiation-Ecological Reserve,
7 Tereshkova Street, Khoyniki 247618, Belarus
Corresponding author: A. P. Golubev (algiv@rambler.ru)

In 2014–2015 we determined the activity of the most abundant radionuclides ^{90}Sr , ^{137}Cs and ^{241}Am in the water column, bottom sediments and dominant species of macrophytes and mollusks in two water bodies of the Belarusian sector of the near zone of the Chernobyl nuclear power plant (ChNPP). Of these, the low-flowing Perstok Lake is the most contaminated with radionuclides water body in Belarus sector of ChNPP, and the flowing Borshchevska waterlogging, which has formed in the past two decades, is characterized by an average level of radiation contamination for the near zone of ChNPP. These data were used to calculate the values of the absorbed dose rate (ADR) during internal exposure for the dominant biota of water bodies from the indicated complex of radionuclides. In the bottom sediments of the Perstok Lake, the activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs reached 185 and 468 $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively, and in the Borshchevska waterlogging, respectively 61 and 212 $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$, which significantly exceeds the pre-accident level. Among the biota organisms, macrophytes were characterized by the highest levels of the activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs . In the Perstok Lake the values of ^{90}Sr and ^{137}Cs activities for them reached 24700 and 40100 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ dry weight, respectively, and in the Borshchevska waterlogging – 8747 and 3780 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ dry weight. Among the mollusks of the Perstok Lake *Anodonta spp.* shells were characterized by the highest activities of ^{90}Sr and ^{137}Cs – up to 50216 and 1049 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ of wet weight. The activity of ^{241}Am in the soft tissues of mollusks is much lower – no more than 780 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ of live weight. The activity of ^{241}Am in bottom sediments and macrophytes of the Perstok Lake during the study period was significantly lower – no more than 4.4 $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ and 202 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ of dry weight, and in the Borshchevska waterlogging – 2.6 $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ and 48.1 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ dry weight. ^{241}Am activity in soft tissues and shells of mollusks from both reservoirs was not recorded in most cases. The total values of ADR from all the studied radionuclides in macrophytes and mollusks varied within 10–28 $\text{mkGy}\cdot\text{day}^{-1}$, and in the mollusk of *Lymnaea stagnalis* – 64 $\text{mkGy}\cdot\text{day}^{-1}$. The greatest contribution to the formation of the total ADR in macrophytes (within 42–99 %) and mollusks (up to 99 %) is made by the $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ isobar. In most cases, the contributions of the $^{137}\text{Cs} + ^{137}\text{Ba}$ and ^{241}Am isobar to the total ADR values are extremely insignificant. Only for the roots of *Typha angustifolia* their contribution reached 37.7 and 20.3 %, respectively. Currently, in the near zone of ChNPP, against the background of a decrease in the activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs , an increase in the activity of ^{241}Am is observed. It is predicted that by the middle of the XXI century ^{241}Am will become the main dose-forming radionuclide for the biota of water bodies in the near zone of the ChNPP.

Keywords: the near zone of the Chernobyl nuclear power plant; Perstok Lake; Borshchevska waterlogging; ^{90}Sr , ^{137}Cs and ^{241}Am ; water; bottom sediments; macrophytes; mollusks; absorbed doses of ionizing radiation.

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС (26.04.1986) привела к значительному радиоактивному загрязнению водоемов 30-километровой зоны отчуждения целым комплексом из около 30 техногенных радионуклидов с резко различными периодами полураспада. За 30-летний послеаварийный период радиационное загрязнение основных компонентов экосистем (донные отложения, вода, биота) проточных водоемов зоны ЧАЭС значительно снизилось. Это обусловлено как радиоактивным распадом короткоживущих изотопов с периодами полураспада от нескольких суток (^{131}I , ^{239}Np и др.) до 1–2 лет (^{144}Ce , ^{106}Ru , ^{134}Cs др.), так и их выносом течением воды в нижележащие участки рек. Осенью 1986 г. в моллюсках зоны ЧАЭС регистрировалось до 15 радионуклидов, а в 1987 г. – 7, 1988 г. – 5, в 1989 г. – лишь 4 (^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce

и ^{106}Ru). С 2002 г. в донных отложениях и биоте водоемов зоны ЧАЭС уверенно регистрировались лишь ^{90}Sr и ^{137}Cs . С другой стороны, радиационное загрязнение малопроточных водоемов ближней (15 км) зоны ЧАЭС и в настоящее время остается достаточно высоким.

На рубеже XX–XXI столетий в почвенном покрове ближней зоны ЧАЭС на фоне снижения активности основных на сегодняшний день дозообразующих радионуклидов – β -излучающего ^{90}Sr и β - γ -излучающего ^{137}Cs изотопов отмечается достаточно быстрый рост активности α -излучающего изотопа ^{241}Am – дочернего продукта β -распада ^{241}Pu [1]. Обладая высокой подвижностью в водной среде, ^{241}Am быстро включается в биотические круговороты и способен накапливаться во многих водных организмах [2–5]. Поэтому ^{241}Am уже в настоящее время начинает оказывать негативное воздействие на биоту водоемов ближней зоны ЧАЭС, что не еще учитывается в большинстве радиоэкологических исследований.

В 2014–2015 гг. нами определена активность важнейших дозообразующих радионуклидов (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{241}Am) в основных компонентах экосистем (вода, донные отложения, биота) оз. Персток и Борщевского затопления с наивысшим и средним для водоемов белорусского сектора зоны ЧАЭС уровнями радиационного загрязнения. На этой основе проведены расчеты вклада каждого радионуклида в суммарные дозы ионизирующей радиации от внутреннего облучения для доминирующих видов биоты этих водоемов – макрофитов и легочных моллюсков.

Материал и методы исследований

Модельные водоемы. Озеро Персток находится в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике (ПГРЭЗ) вблизи отселенной д. Масаны (рис. 1). Район отбора проб ($51^{\circ}.30.328^1$ с. ш.; $30^{\circ}.00.903^1$ в. д.) находился на северо-восточном берегу озера, на расстоянии приблизительно 14 км по прямой от ЧАЭС. Ложе озера, расположенное в пойме Припяти в 2 км от ее русла, вытянуто в меридиональном направлении. Оно практически непроточно и подпитывается преимущественно за счет паводковых и грунтовых вод, а также атмосферных осадков. Лишь иногда в периоды очень высоких паводков в него с юго-запада проникают воды Припяти. После малоснежной зимы и (или) в жаркое засушливое лето урез воды может отступать на 6–9 м от среднего многолетнего уровня, обнажая широкую литоральную зону. В маловодные годы длина озера составляет 1450 м, максимальная ширина – 98 м, площадь – 0,9 км², глубина – до 1,6 м [6].

Борщевское затопление начинается на северо-западнее плотины на Погонянском канале между отселенными деревнями Масаны и Борщевка и простирается в юго-восточном направлении до окрестностей отселенной д. Чемков. Район отбора проб ($51^{\circ}53'6851$ с.ш.; $29^{\circ}9'36213$ в. д.) расположен у моста на дороге Красноселье – Масаны (рис. 1).

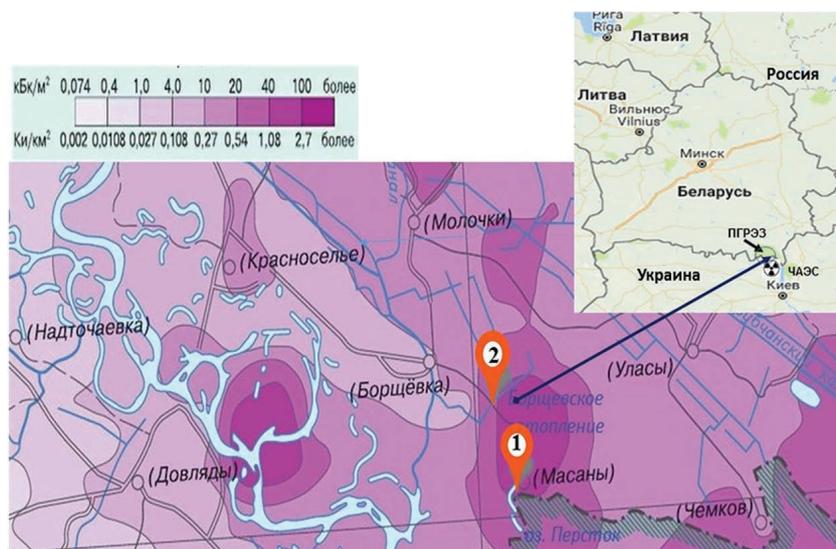


Рис. 1. Районы отбора проб: 1. Озеро Персток. 2. Борщевское затопление

Fig. 1. Sampling areas: 1. Perstok Lale. 2. Borshchevska waterlogging

Этот малопроточный водоем начал формироваться лишь в начале 1990-х гг. как результат снижения пропускной способности близлежащих мелиоративных каналов, заросших высшей водной растительностью. По данным на 2016 г., длина водоема составляла 16,5 км, а средняя площадь – 11,8 км².

Берега, формирование которых еще не полностью завершено, местами заторфованы, поросли ивой, ольхой черной и березой, а на возвышенных участках – сосной.

В зону затопления, оконтуренную изогипсой с абсолютной высотой около 110 м, попали мелиоративные каналы, заболоченные участки и тальвеги ложбин стока [7]. Максимальные глубины, достигающие в межень 1,5–2,1 м, приурочены к руслам мелиоративных каналов; в затопленных понижениях рельефа глубины обычно не превышают 0,5–1,1 м. В половодье уровень воды повышается лишь на 0,2–0,8 м. Прозрачность воды не более 1,1 м.

Модельные виды. Среди макрофитов взяты виды из следующих биотопических групп.

1. Укореняющиеся водно-болотные растения, стебли и листья которых находятся над поверхностью воды (гелофиты): рогоз узколистный *Typha angustifolia* и аир обыкновенный *Acorus calamus*.

2. Укореняющиеся полупогруженные растения с плавающими на поверхности воды листьями: водокрас лягушачий *Hydrocharis morsus-ranae*.

3. Погруженные в воду укореняющиеся растения, которые определенную часть сезона вегетации находятся в плавающем состоянии: телорез алоэвидный *Stratiotes aloides*, уруть колосистая *Myriophyllum spicatum*.

4. Среди легочных моллюсков взяты их доминирующие виды – большой прудовик *Lymnaea stagnalis* и катушка *Planorbis planorbis*, а среди двустворчатых – беззубка *Anodonta sp.*

Отбор проб проводился в середине июля 2014 и 2015 гг. Донные отложения отбирали на расстоянии 30–50 см от уреза воды на глубине 20–30 см. Поршневым пробоотборником с внутренним диаметром 43 мм брались колонки грунта на глубину первых 5 см от его поверхности, так как в этом слое сосредоточено до 95 % радионуклидов, находящихся в донных отложениях [6]. На каждую пробу отбирали по 5 колонок так, чтобы общий объем пробы грунта составлял приблизительно 500 см³.

Пробы воды вместе с сестоном отбирали в местах отбора проб грунта на расстоянии 1,5–2 м от уреза воды, где глубина водоема достигала 0,8–1,0 м. Вода из оз. Персток характеризуется высоким содержанием сестона. Поэтому активность проб воды определяли в трех состояниях.

1. Вода с небольшим осадком сестона.

2. Сильно взболтанная вода, в которой сестон распределялся равномерно по всему объему.

3. Надосадочная жидкость над осевшим слоем сестона в пробах воды, отстоянной в течение недели.

Отобранные в водоемах макрофиты в лаборатории гомогенизировали посредством разрезания на мелкие фрагменты размером до 2–3 см. Затем из них отбирали отдельные навески, у которых определяли сырую массу. При возможности у отдельных видов макрофитов пробы разделяли на стебель и корни. Затем навески высушивали в течение нескольких суток на воздухе до достижения постоянной (воздушно-сухой) массы и использовали для определения активности радионуклидов в них.

Отловленных половозрелых особей *L. stagnalis* (высота раковины 42–47 мм) в течение 3–4 ч доставляли в лабораторию. Там у них сразу же отделяли мягкие ткани вместе с гемолимфой от раковин. Раковины не промывали во избежание удаления абсорбированных на внешней поверхности радионуклидов и досушивали до воздушно-сухой массы. У катушек *C. corneus* полностью отделить мягкие ткани от раковины практически невозможно. Поэтому отловленных половозрелых особей гомогенизировали посредством растирания в ступке до однородной массы.

Определение активности радионуклидов. Активность ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs определяли на гамма-бета спектрометре *МКС-АТ1315* Научно-производственного объединения «Атомтех» (Беларусь). Детектором γ -излучения в нем является сцинтилляционный блок с кристаллом NaI(Tl) Ø63×63 мм, а β -излучения – сцинтилляционный блок с пластмассовым сцинтиллятором Ø128×8 мм. Спектрометр обеспечивает регистрацию спектра γ - и β -излучения в диапазоне энергий соответственно 50–3000 кэВ и 150–3500 кэВ. Относительное энергетическое разрешение детектора γ -излучения для линии с энергией 661,6 кэВ составляет $8 \pm 0,2$ %. Предел допустимой основной относительной погрешности измерения активности ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs при доверительной вероятности 0,95 не превышает ± 20 %.

Определение активности ²⁴¹Am проводили в гамма-спектрометре с полупроводниковым детектором на основе высокочистого германия с композитным углеродным окном фирмы *Canberra* (США) с многоканальным анализатором *DSA 1000*. Детектор с композитным углеродным окном имеет относительную эффективность 50 % и позволяет проводить измерение гамма и рентгеновского излучения в диапазоне от 20 кэВ до 2 МэВ. Для снижения уровня фонового излучения детектор помещен в свинцовую защиту модели 747Е массой около 1 т. Внутренняя поверхность измерительной камеры покрыта кадмиево-медным экраном.

Расчеты доз облучения биоты водоемов ЧАЭС. Дозы облучения организмов биоты зависят от удельной активности радионуклидов непосредственно в организме, компонентах среды обитания, а также от размеров организма и особенностей его поведения, в частности, от времени пребывания организмов в зонах с разным уровнем радиоактивного загрязнения. Показателем дозовой нагрузки на

биоту является МПД в организме в равновесных условиях поступления и выведения радионуклидов из внешней среды. МПД рассчитывается как средняя для всего организма при условии равномерного распределения радионуклидов по всему организму.

Согласно рекомендациям МАГАТЭ [8], при незначительных плотностях радиоактивных выпадений наиболее рациональным при расчетах МПД является консервативный подход. Он заключается в том, что параметры для оценок МПД выбираются для условий максимальных содержаний радионуклидов в исследуемой среде.

Скрининговый расчет доз облучения выполнен по консервативной дозиметрической модели рекомендованной в документе МАГАТЭ SRS № 19 [9]. Обобщенные миграционные и дозиметрические модели, представленные в этом документе, являются оптимальными для такого рода оценок. В наших исследованиях МПД для организмов биоты водоемов зоны ЧАЭС для 2016 г. произведены только для внутреннего облучения, поскольку вклад внешнего облучения в общие величины МПД в 2016 г. оказался исчезающе малым.

В работе представлена оценка вклада основных на сегодняшний день дозообразующих радионуклидов для биоты водоемов зоны ЧАЭС – ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{241}Am . Поскольку радиоактивный распад первых двух радионуклидов происходит в две стадии с образованием промежуточных короткоживущих радионуклидов (соответственно β -изотопа ^{90}Y и γ -изотопа ^{137}Ba) расчеты МПД произведены суммарно для изобар $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ и $^{137}\text{Cs} + ^{137}\text{Ba}$.

Суммарное значение МПД от отдельного радионуклида определено по формуле:

$$\dot{D}_j = \sum_i (CR_{ji}^{water_fresh} \cdot f_j^{water_fresh} \cdot C_i^{water_fresh} \cdot DC_{ji}),$$

где $CR_{ji}^{water_fresh}$ – коэффициент перехода i -го радионуклида из пресной воды в организм j -го вида биоты, (Бк·кг⁻¹ сырой массы организма)/(Бк·кг⁻¹);

$f_j^{water_fresh}$ – доля времени, проводимая j -ым видом биоты в пресной воде, отн. единицы. Поскольку все исследованные нами виды являлись водными организмами, это значение для них принято равным единице.

$C_i^{water_fresh}$ – концентрация i -го радионуклида в пресной воде, Бк·л⁻¹;

DC_{ji} – дозовый коэффициент перехода от активности в теле j -го организма к дозе внутреннего облучения от i -го радионуклида, (мкГр·сут⁻¹)/(Бк·кг⁻¹ сырой массы организма).

Погрешность приведенных ниже расчетов составляет порядка 50 %. На неопределенность результатов оценок влияют региональные условия, определяющие интенсивность миграционных процессов, вариабельность дозовых коэффициентов основных дозообразующих радионуклидов, а также такие субъективные причины, как перечень контролируемых радионуклидов в объектах природной среды [10].

Для верификации оценки дозовых нагрузок на биоту использовался online калькулятор, разработанный Международной комиссией по радиационной защите [http://biotadc.icrp.org/].

Результаты исследования и их обсуждение

Поступившие в водоемы зоны загрязнения ЧАЭС «чернобыльские» радионуклиды сконцентрировались преимущественно в донных отложениях и макрофитах, в значительно меньшей степени – в зоопланктоне и зообентосе [2; 3; 11]. В 2014–2015 гг. уровни радиоактивного загрязнения ^{90}Sr и ^{137}Cs донных отложений обоих модельных водоемов сохранялись на достаточно высоком уровне (табл. 1 и 2). При этом активность ^{137}Cs оказалась значительно выше, чем ^{90}Sr , что обусловлено расположением водоемов в пределах «цезиевых пятен», характерных для ближней зоны ЧАЭС [12].

Активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в водной толще модельных водоемов оказалась на 2–3 порядка ниже, чем в донных отложениях. Важным фактором аккумуляции ^{137}Cs в водной толще оз. Персток является сестон. Об этом свидетельствуют значительные различия (в 2–3 раза) активности ^{137}Cs в отстоянной в течение нескольких суток воде (прозрачной надосадочной жидкости над осадком сестона) по сравнению с хорошо взболтанной водой, в которой сестон распределялся равномерно по всему объему. Напротив, содержание сестона в воде Борщевского затопления незначительно, что обуславливает низкую активность всех радионуклидов в ней.

Активность ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{241}Am в иловых отложениях литорали оз. Персток существенно выше, чем в песчаных грунтах Борщевского затопления, что во многом обусловлено гидрологическими особенностями обоих водоемов. На мелководной литорали оз. Персток ветровое перемешивание воды вымывает верхний слой донных отложений вместе с содержащимися в нем радионуклидами в придонный слой воды, что приводит к повышению концентрации сестона в водной толще. Густые

заросли полупогруженной литоральной растительности (аир, рогоз и др.) создают естественный барьер, препятствующий выносу сестона с радионуклидами в сублиторальную зону озера. Напротив, зарастаемость Борщевского затопления, существующего непродолжительное время, еще очень низка. Поэтому в нем не сформировался существенный слой иловых отложений, а песчаные и торфяные грунты, образующие дно затопления, обладают пониженной способностью к накоплению радионуклидов [13]. Уровни активности ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{241}Am в макрофитах оз. Персток существенно выше таковых в Борщевском затоплении, что хорошо коррелирует с уровнями их активности в донных отложениях этих водоемов.

Активность ^{137}Cs и ^{241}Am в корнях гелофитов *T. angustifolia* и *A. calmus* из Борщевского затопления, находящихся в донных отложениях, где в наибольшей степени концентрируются эти радионуклиды, значительно выше, чем в их стеблях, значительная часть которых находится над поверхностью воды. Это указывает на очень низкую скорость миграции радионуклидов из корней в стебли растений. В большинстве случаев активность ^{90}Sr в макрофитах в 2–3 раза превышает активность ^{137}Cs . Наивысшей способностью к аккумуляции радионуклидов, особенно ^{90}Sr (до 25 000 Бк·кг⁻¹), отличаются стебли *S. aloides* и *H. morsus-ranae*.

Таблица 1

Объемная активность важнейших дозообразующих радионуклидов в компонентах экосистемы оз. Персток в 2014–2015 гг.

Table 1

Volumetric activity of the most important dose-forming radionuclides in the ecosystem components of Lake Perstok in 2014–2015

Компонент экосистемы, единицы измерения	Год	Активность		
		^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am
Вода взболтанная, Бк·л ⁻³	2014	19,4 ± 4,6	< 20*	< 0,25*
Вода отстоянная; надосадочный слой, Бк·л ⁻³	2014	8,1 ± 2,2	< 20*	< 0,25*
	2015	9,3 ± 3,0	< 20	< 0,25
Донные отложения, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	6551 ± 1310	2596 ± 547	62 ± 12
Донные отложения, кБк·м ⁻²	2014	468 ± 94	185 ± 39	4,4 ± 0,9
	2015	250 ± 50	105 ± 23	2,48 ± 0,57
<i>Typha angustifolia</i> , корень мытый, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	11 241 ± 2248	2006 ± 424	202 ± 39
<i>Typha angustifolia</i> , стебель, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	750 ± 200	2800 ± 600	6,2 ± 1,8
	2015	684 ± 215	3700 ± 750	< 3,8
<i>Stratiotes aloides</i> , листья, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	9500 ± 1900	24 700 ± 4900	76 ± 16
	2015	40 100 ± 900	23 400 ± 760	5,4 ± 2,3
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i> , листья, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	11 100 ± 2200	18 200 ± 3600	93 ± 19
	2015	660 ± 170	12 000 ± 2400	*
<i>Lymnaea stagnalis</i> , <i>Coretus corneus</i> , все тело, Бк·кг сырой массы	2015	660 ± 170	12 000 ± 2400	*
<i>Viviparus viviparus</i> , все тело, Бк·кг ⁻¹ сырой массы	2015	780 ± 170	1400 ± 310	*
<i>Viviparus viviparus</i> , раковина, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой	2015	303 ± 118	18 598 ± 3720	*
<i>Anodonta sp.</i> , все тело, Вк·кг ⁻¹ сырой массы	2015	523 ± 125	2150 ± 460	**
<i>Anodonta sp.</i> , раковина, Бк·кг ⁻¹ сырой массы	2015	1049 ± 335	50 216 ± 10 043	*

* – ниже минимально детектируемой активности; ** – не проводили.

Объемная активность важнейших дозообразующих радионуклидов
в компонентах экосистемы Борщевского затопления в 2014–2015 гг.

Table 2

Volumetric activity of the most important dose-forming radionuclides
in the ecosystem components of the Borshevska waterlogging in 2014–2015

Компонент экосистемы, единицы изменения	Год	Объемная активность		
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²⁴¹ Am
Водная толща, Бк·л ⁻³	2014	< 2,5*	< 20*	< 0,20*
	2015	2,5 ± 2,0	< 20*	< 0,20*
Донные отложения, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	3062 ± 612	165 ± 72	22,3 ± 4,4
	2015	4376 ± 582	898 ± 219	35,8 ± 8,3
Донные отложения, Бк·м ⁻²	2014	217 ± 43,4	11,8 ± 5,1	1,6 ± 0,3
	2015	212 ± 43,0	61,0 ± 22,9	2,6 ± 0,26
<i>Acorus calamus</i> , стебель, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	519 ± 161	13 50 ± 300	4,9 ± 1,9
	2015	1380 ± 350	3 320 ± 740	4,8 ± 2,5
<i>Acorus calamus</i> , корень мытый, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	3780 ± 780	1350 ± 300	4,5 ± 1,9
	2015	2459 ± 538	5292 ± 1085	26,5 ± 12,5
<i>Stratiotes aloides</i> , розетка листьев, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	4553 ± 949	4568 ± 914	13,3 ± 5,1
	2015	2700 ± 650	8747 ± 1749	27,0 ± 7,0
<i>Myriophyllum spicatum</i> , стебли, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	2807 ± 626	5465 ± 1093	36,7 ± 7,2
	2015	3587 ± 774	4078 ± 816	48,1 ± 11,1
<i>Typha angustifolia</i> , стебли, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2015	311 ± 149	1441 ± 355	< 2,3
<i>Typha angustifolia</i> , корень мытый, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2015	1755 ± 414	685 ± 24	14,5 ± 3,8
<i>Lymnaea stagnalis</i> , мягкие ткани вместе с гемолимфой**, Бк·кг ⁻¹ сырой массы	2014	166 ± 41	275 ± 80	< 1,5*
<i>Lymnaea stagnalis</i> , раковина, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	50 ± 7	11 354 ± 800	< 0,2*
<i>Lymnaea stagnalis</i> , все тело, Бк·кг ⁻¹ сырой массы**	2014	166*	942*	< 0,2*
<i>Stagnicola corvus</i> , все тело, Бк·кг ⁻¹ сырой массы**	2015	74,0 ± 39,0	3317 ± 663	*
<i>Coretus corneus</i> , все тело вместе с раковиной, Бк·кг ⁻¹ сырой массы	2014	125 ± 52	6519 ± 304	< 1,53
	2015	108 ± 48	6221 ± 1226	*
<i>Coretus corneus</i> , раковина, Бк·кг ⁻¹ сухой массы	2015	101 ± 98	17 191 ± 3438	*

* – ниже минимально детектируемой активности; ** – рассчитано по сумме активностей радионуклидов в мягких тканях и раковине с учетом соотношений масс последних.

Активность ¹³⁷Cs мягких тканях моллюсков значительно ниже, чем у макрофитов, а активность ⁹⁰Sr в сухом веществе раковин – выше. Установленные различия обусловлены биологическими свойствами этих радионуклидов. Щелочной металл ¹³⁷Cs как биологический аналог калия и натрия накапливается преимущественно в мягких тканях моллюсков. Он отличается высокой мобильностью и в результате процессов метаболизма быстро выводится из организма. Напротив, щелочноземельный металл ⁹⁰Sr, являющийся биологическим аналогом кальция, концентрируется преимущественно в массивных и метаболически малоактивных раковинах, откуда практически не выводится.

В 2014–2015 гг. активность ²⁴¹Am в донных отложениях модельных водоемов оставалась еще очень низкой по сравнению с активностью ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs. Тем не менее, ²⁴¹Am начал уже активно включаться в биоту водоемов, в первую очередь, в макрофиты. Так, в корневищах *T. angustifolia* его активность достигла 202 Бк·кг⁻¹. Активность ²⁴¹Am в других органах макрофитов из обоих водоемов существенно ниже – до 93 Бк·кг⁻¹ в листьях *H. morsus-ranae* из оз. Персток.

Максимальный уровень МПД для исследованных компонентов биоты модельных водоемов отмечен для *L. stagnalis*. В большинстве случаев преобладающую долю МПД создает изобара $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ (табл. 3). При этом у легочного моллюска *L. stagnalis* ее доля достигает 99 % от общей МПД. Это обусловлено тем, что попавший в организм моллюсков ^{90}Sr в больших количествах аккумулируется в их массивных раковинах, откуда практически не выводится. Этот же вид характеризуется и наивысшим среди исследованных видов уровнем МПД – 63,6 мкГр·сутки⁻¹. Вклад изобары $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ в МПД у *L. stagnalis* не превышает 1 %, а наличие ^{241}Am в его организме вообще не установлено.

Макрофиты отличаются существенно более низкими уровнями МПД – не более 28 мкГр·сутки⁻¹ в оз. Персток и 7 мкГр·сутки⁻¹ в Борщевском затоплении. У всех исследованных макрофитов наибольший вклад в суммарную МПД также вносит изобара $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, однако ее доля существенно ниже, чем у *L. stagnalis*. При этом в формировании МПД у макрофитов определенный вклад начал вносить ^{241}Am , а для корней *T. angustifolia* он достигает даже 20 %.

Таблица 3

Поглощенные дозы ионизирующей радиации у доминирующих видов биоты водоемов зоны ЧАЭС в июле 2014 г.

Table 3

Absorbed doses of ionizing radiation in the dominant species of biota in the water bodies of the Chernobyl zone in July 2014

Вид, часть тела	Поглощенная доза, мкГр·сутки ⁻¹ ± 25 %		
	$^{137}\text{Cs} + ^{137}\text{Ba}$	$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	^{241}Am
Озеро Персток			
<i>Typha angustifolia</i> , стебель	1,6 (16,3)*	8,10 (82,9)	0,07 (8,0)
<i>Typha angustifolia</i> , корень	2,6 (37,7)	2,90 (42,0)	1,4 (20,3)
<i>Stratiotes aloides</i> , стебель	1,7 (6,1)	26,0 (92,6)	0,3 (1,3)
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i> , стебель	1,8 (6,9)	24,0 (91,5)	0,43 (1,6)
Борщевское затопление			
<i>Stratiotes aloides</i> , стебель	1,0 (15,4)	5,30 (81,5)	0,20 (3,1)
<i>Myriophyllum spicatum</i> , стебель	0,52 (7,6)	6,10 (89,5)	0,20 (2,9)
<i>Acorus calamus</i> , стебель	0,23 (8,0)	2,60 (90,0)	0,06 (2,0)
<i>Lymnaea stagnalis</i> , все тело	0,61 (1,0)	63,0 (99,0)	**

* – в скобках – вклад каждого радионуклида в суммарную эквивалентную дозу, %; ** – ниже минимально детектируемой активности.

В многолетней динамике радиоактивного загрязнения территорий белорусского сектора зоны ЧАЭС в 1986–2015 гг. выделяются три последовательных этапа [14].

1. Начальный йодно-нептуниевый этап, характеризуется преимущественно короткоживущими радионуклидами (^{131}I , ^{239}Np и др.) с периодом полураспада до нескольких недель. Он начался сразу же после аварии на ЧАЭС и продолжался до конца 1986 г.

2. Промежуточный церий-рутениевый этап, обусловленный радионуклидами с периодом полураспада около года (^{144}Ce , ^{106}Ru , ^{134}Cs др.), который закончился в конце 1990-х гг.

3. Современный стронций-цезиевый этап, обусловленный радионуклидами ^{90}Sr и ^{137}Cs с периодами полураспада около 30 лет. Он начался в конце 1980-х гг. и продолжается до настоящего времени.

В 2014–2015 гг., почти через 30 лет после аварии, уровни активности ^{90}Sr и ^{137}Cs в донных отложениях и макрофитах исследованных малопроточных водоемов остаются очень высокими (рис. 2, 3). Активность ^{137}Cs в моллюсках низкая по сравнению с таковой для макрофитов, однако все еще значительно превышает естественный (доаварийный) уровень для пресноводного макрозообентоса (моллюски, ракообразные, пиявки), составляющий не более 4–8 Бк·кг⁻¹ сырой массы [15].

При этом активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в донных отложениях и биоте проточных водоемов зоны ЧАЭС (участок р. Припять и ее притоки в ближней зоне ЧАЭС и др.) уже к 2010 г. снизились практически до естественного (доаварийного) уровня (рис. 2, прямая 1; рис. 3, прямая 1). Показательно, что γ -активность донных отложений в оз. Персток за 30-летний послеаварийный период снижалась быстрее (рис. 2, прямая 2) по сравнению с расчетными данными для гипотетического изолированного водоема (рис. 2, прямая 3). Очевидно, в оз. Персток имеет место перенос радионуклидов из донных отложений в подземные воды.

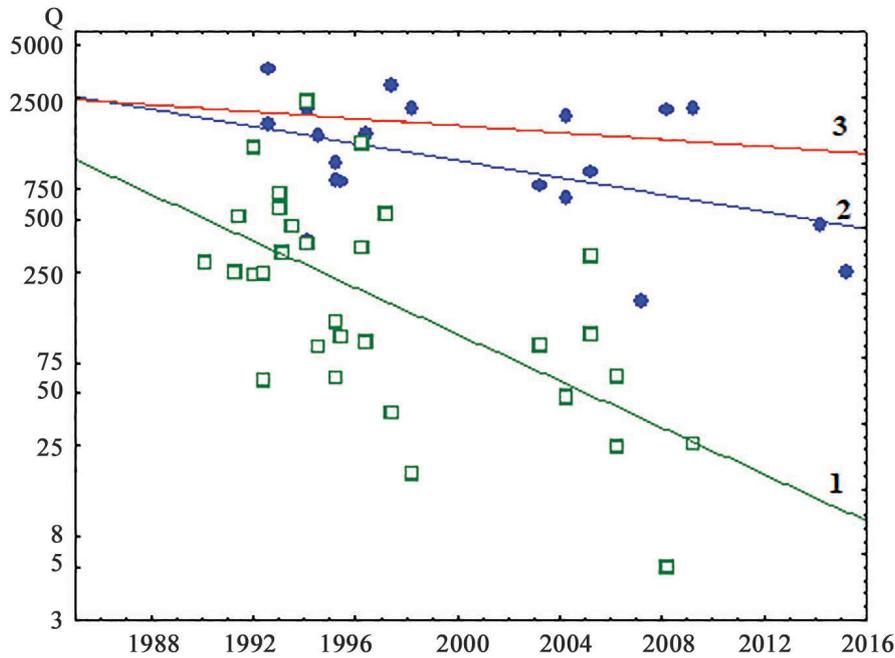


Рис. 2. Многолетняя динамика активности ^{137}Cs (Q , $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$) в донных отложениях разнотипных водоемов зоны загрязнения Чернобыльской АЭС: 1. Проточные водоемы ($Q_t = 811e^{-0.1468t}$).

2. Малопроточное оз. Персток ($Q_t = 1958e^{-0.0358t}$). По результатам [4; 16] и настоящего исследования.

3. Теоретическая линия снижения активности ^{137}Cs ($Q_t = 2400e^{-0.023t}$) в донных отложениях гипотетического и изолированного водоема зоны ЧАЭС. Здесь и на рис. 3 t – промежуток времени (годы) после аварии, считая от 1 мая 1986 г.

Fig. 2. Long-term dynamics of ^{137}Cs activity (Q , $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$) in bottom sediments of different types of reservoirs in contamination zone of the Chernobyl nuclear power plant: 1. Flowing reservoirs ($Q_t = 811e^{-0.1468t}$). 2. Low-flowing lake Perstok ($Q_t = 1958e^{-0.0358t}$). According to the results of [4; 16] and the present study. 3. Theoretical line of ^{137}Cs activity decrease ($Q_t = 2400e^{-0.023t}$) in bottom sediments of a hypothetical isolated water body of the Chernobyl zone. Here and in fig. 3 t – time interval (years) after the accident, counting from May 1, 1986

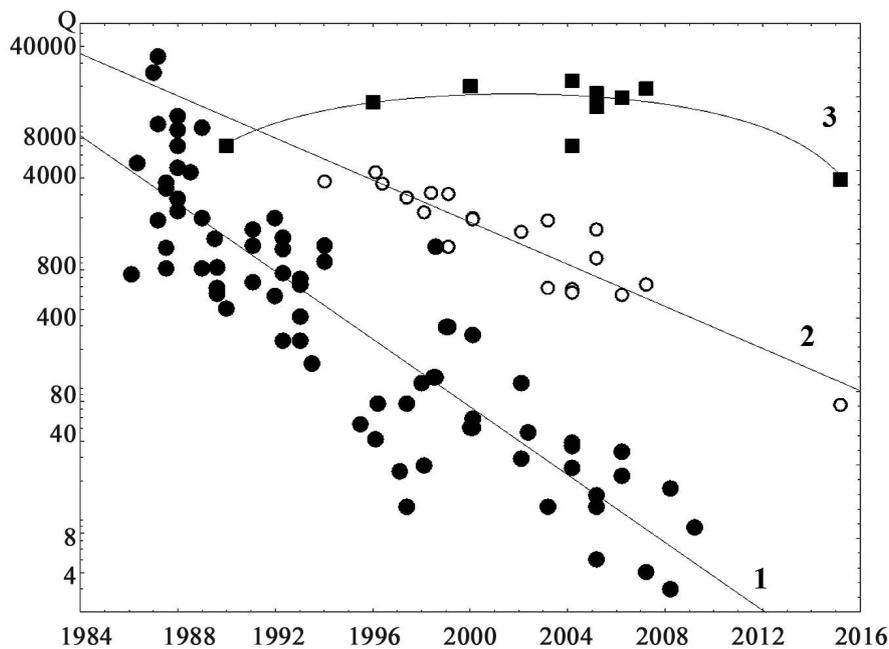


Рис. 3. Многолетняя динамика активности ^{137}Cs и ^{90}Sr у брюхоногих моллюсков (Q , $\text{Bq}\cdot\text{kg}$ сырой массы $^{-1}$) из разнотипных водоемов зоны загрязнения Чернобыльской АЭС: 1. ^{137}Cs , проточные водоемы ($Q_t = 4584e^{-0.2989t}$).

2. ^{137}Cs , малопроточное озеро Персток ($Q_t = 21983e^{-0.1795t}$). 3. ^{90}Sr , малопроточное оз. Персток ($Q_t = 688 + 2221t - 72.4t^2$).

Вершина кривой (3) соответствует $t = 16$ лет после аварии, что приходится на конец апреля 2002 г.

Fig. 3. Long-term dynamics of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity (Q , $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$) in bottom sediments of different types of reservoirs in contamination zone of the Chernobyl nuclear power plant: 1. ^{137}Cs , flowing water bodies ($Q_t = 4584e^{-0.2989t}$).

2. ^{137}Cs , low-flowing lake Perstok ($Q_t = 21983e^{-0.1795t}$). 3. ^{90}Sr , low-flowing lake Perstok ($Q_t = 688 + 2221t - 72.4t^2$).

The top of curve (3) corresponds to $t = 16$ years after the accident, which falls at the end of April 2002

В отличие от активности ^{137}Cs , динамика активности ^{90}Sr у моллюсков оз. Персток в послеварийный период передается куполообразной кривой с минимальными значениями в 1986–1987 гг. (рис. 3, кривая 3). Это обусловлено тем, что выпадения ^{137}Cs имели мелкодисперсный характер и при попадании в водоемы этот радионуклид активно поглощался биотой. Напротив, в первые послеварийные годы основной пул ^{90}Sr находился в составе достаточно крупных и биологически инертных «топливных частиц» [17]. Однако постепенное их разрушение в результате ряда физико-химических процессов привело к выделению свободного ^{90}Sr . Последний быстро включался в биотические круговороты, концентрируясь преимущественно в макрофитах, а как химический аналог кальция и в раковинах моллюсков (табл. 1). Пик активности ^{90}Sr в моллюсках оз. Персток (рис. 3, кривая 3) приходился на 2001–2002 гг., когда степень деструкции «топливных частиц» достигла 90–95 %. В последующие годы активность ^{90}Sr в моллюсках начала снижаться с такой же скоростью, как и ^{137}Cs , поскольку периоды их полураспада очень близки.

В обоих модельных водоемах доминирующую роль в биогенной миграции радионуклидов играют макрофиты. Максимальная биомасса их сообществ в водоемах умеренной зоны составляет около 1 кг сырого вещества на 1 м² [18]. При отмирании макрофитов в осенне-зимний период преобладающая часть депонированных в них радионуклидов переходит в донные отложения, а их остаток – в воду. Отмирающая биомасса макрофитов является одним из важнейших факторов илообразования в стоячих и малопроточных водоемах. Иловые отложения, содержащие большое количество гуминовых веществ, являются эффективными концентраторами радионуклидов. В последующий сезон вегетации часть радионуклидов, депонированных в донных отложениях, вновь вовлекается быстрорастущими макрофитами в биотический круговорот.

Сообщества моллюсков, несмотря на их более низкую по сравнению с макрофитами биомассу, играют важную роль в процессах перевода радионуклидов из подвижного в связанное состояние. Раковины отмерших моллюсков, где накапливаются значительные количества ^{90}Sr , захораниваются в донных отложениях. Там они с трудом подвергаются разрушению под воздействием биологических и физико-химических факторов.

Наряду со снижением активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в ближней зоне ЧАЭС с начала XXI в. отмечается существенный рост активности ^{241}Am и других радионуклидов из семейства актиноидов. В почвенном покрове ближней зоны ЧАЭС сосредоточены значительные запасы ^{241}Am – в среднем 300–400 Бк·кг⁻¹ при максимальных значениях более 600 Бк·кг⁻¹ [1]. Подземными водами и атмосферными осадками ^{241}Am вносится в близлежащие водоемы, где быстро включаются биотические круговороты. Однако миграции ^{241}Am , как и других радиоизотопов семейства актиноидов, в водоемах белорусского сектора зоны ЧАЭС, исследована в значительно меньшей степени, чем миграции ^{90}Sr и ^{137}Cs . Так, в 2002 г. активность комплекса $^{239,240}\text{Pu}$ в погруженных макрофитах оз. Персток изменялась в пределах 16–32 Бк·кг⁻¹ воздушно-сухой массы, а его материнского изотопа ^{241}Am – в пределах 5,7–20 Бк·кг⁻¹ воздушно-сухой массы. Активность всего комплекса актиноидов в полупогруженных макрофитах здесь была существенно ниже – в пределах 0,2–1,4 Бк·кг⁻¹. Еще ниже ^{241}Am и комплекса $^{239+240}\text{Pu}$ отмечена в моллюсках оз. Персток в 2002 г. – соответственно 0,35 и 0,25 Бк·кг⁻¹ [17].

Активность ^{241}Am в донных отложениях оз. Персток и Борщевского затопления в 2008 г. – 40,0 и 12,8 кБк·м⁻² соответственно [7] была почти на порядок выше таковой в 2014–2015 гг. (табл. 1, 2), что находится в противоречии с данными о росте его активности в почвах ближней зоны ЧАЭС. Вероятно, активность ^{241}Am в донных отложениях, как и активность ^{90}Sr и ^{137}Cs (рис. 1), подвержена существенным многолетним колебаниям, обусловленным многочисленными абиотическими и биотическими факторами. Поэтому короткий период наблюдений (2008–2015 гг.) не позволяет сделать определенных выводов о характере многолетней динамики активности ^{241}Am в экосистемах водоемов зоны ЧАЭС.

При этом активность ^{241}Am в теле пресноводных моллюсков по сравнению с макрофитами продолжает оставаться очень низкой. Это находится в существенном противоречии с результатами лабораторных экспериментов по аккумуляции ^{241}Am органами и тканями у других водных животных – карася *Carassius auratus gibelio* [5] и кальмара *Octopus vulgaris* [18]. Суммарные значения активности ^{241}Am для всего организма у *C. a. gibelio* составляли почти 400 Бк·кг⁻¹ сырой массы, при этом в тканях пищеварительного тракта они достигали 2,951 кБк·г⁻¹ сырой массы. Еще более высокая активность ^{241}Am отмечена у *O. vulgaris* – 8,1 кБк·г⁻¹ сырой массы.

Однако следует учитывать, что особей *O. vulgaris* в эксперименте в течение 70 суток содержали в воде с активностью ^{241}Am , равной 1 кБк·л⁻¹, что на несколько порядков выше, чем в водоемах зоны ЧАЭС, а в организм *C. a. gibelio* значительные количества ^{241}Am попадали с искусственно обогащенной им пищей. Тем не менее, эти данные убедительно доказывают, что потенциальная способность к накоплению ^{241}Am водными пойкилотермными животными может быть очень высокой.

В первое десятилетие после аварии важнейшим дозообразующим фактором для бентосных организмов водоемов зоны ЧАЭС являлось внешнее излучение от γ -излучающих радионуклидов (преимущественно

^{137}Cs), аккумулированных в донных отложениях [20]. Внешнее излучение от α - и β -радионуклидов не вносило существенного вклада в дозовые нагрузки по причине малого (до 1 мм) пробега α - и β -частиц в плотных средах.

Летом 1986 г., когда γ -активность донных отложений водоемов зоны ЧАЭС была максимальной, МПД от внешнего γ -облучения для *L. stagnalis* в оз. Персток достигала 997 мкГр·сутки⁻¹ [20]. В водоеме-охладителе ЧАЭС, находящемся в непосредственной близости от станции, эти показатели были еще выше. В конце апреля 1986 г. значения МПД от донных отложений здесь достигали 10–20 Гр·сут⁻¹, а от воды – только 2–3 мГр·сут⁻¹ [21]. Однако уже в 1987 г. значения МПД от внутреннего облучения в тканях моллюсков в водоеме-охладителе ЧАЭС снизились до 0,10–0,21 Гр·сут⁻¹ [22].

В последующие годы уровни МПД от внешнего облучения для моллюсков оз. Персток быстро уменьшались параллельно со снижением γ -активности донных отложений. К лету 2003 г. МПД здесь уже не превышали 5,2 мкГр·сутки⁻¹ [20]. Уровни МПД при внутреннем облучении от инкорпорированных в организмах биоты радионуклидов снижались значительно медленнее, и уже в 1989 г. внутреннее облучение стало ведущим дозообразующим фактором для гидробионтов зоны ЧАЭС [23]. Показательно, что еще в 2001–2005 гг. уровни МПД от внутреннего облучения у макрофитов из ряда водоемов украинского сектора зоны ЧАЭС (Дальнее, Глубовое, Азбучин и др.) изменялись в пределах 23–123 мГр·сутки⁻¹. Основной вклад в МПД вносил ^{137}Cs , а суммарный вклад ^{241}Am и других актиноидов не превышал 1 % [2].

По нашим данным (табл. 3), основной вклад в величину МПД у исследованных видов макрофитов из обоих водоемов вносила изобара $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, доля которой в ряде случаев достигала 90 % и даже более. Это говорит о высоком уровне поглощения макрофитами ^{90}Sr из донных отложений.

Обращает на себя внимание очень высокий уровень МПД, создаваемый α -излучающим радионуклидом ^{241}Am (8–20 %) в корнях макрофитов оз. Персток. К сожалению, значение коэффициента качества для α -излучения Международная комиссия по радиационной защите к настоящему времени установила только для человека [24], для которого он принят равным 20,0. Это не позволяет по формальным причинам рассчитать эквивалентные дозы облучения, создаваемые ^{241}Am , у исследованных нами пойкилотермных организмов – макрофитов и моллюсков. Однако, учитывая принципиальную схожесть механизмов радиационного воздействия на базовые уровни биологической организации (ДНК, РНК, органеллы, клетки) у гомеотермных и пойкилотермных организмов, можно с определенным основанием предположить, что относительный вклад ^{241}Am в эквивалентные дозы ионизирующей радиации у исследованных организмов биоты водоемов зоны ЧАЭС, будет существенно превышать их вклад в уровни МПД.

Заключение

Период полураспада ^{241}Am значительно длиннее, чем его материнского изотопа ^{241}Pu – 432,6 и 14,4 лет соответственно. Поэтому соотношение активностей $^{241}\text{Am}/^{241}\text{Pu}$ в зоне ЧАЭС в последующие годы будет только возрастать. Если непосредственно после аварии в 1986 г. этот показатель составлял $0,13 \pm 0,03$, то, по прогнозам, к 2056 г. он достигнет своего максимального уровня – $2,6 \pm 0,6$ [25]. Затем в малопроточных водоемах зоны ЧАЭС достигнутый максимальный уровень активности ^{241}Am будет медленно снижаться в течение нескольких последующих столетий.

Учитывая дальнейшее снижение активности ^{90}Sr и ^{137}Cs и параллельный рост активности ^{241}Am в воде, донных отложениях и биоте, уже в ближайшие десятилетия ^{241}Am станет важнейшим дозообразующим фактором для биоты (в первую очередь, макрофитов) малопроточных водоемов ближней зоны ЧАЭС. Это означает наступление IV, актинидного этапа динамики радиоактивного загрязнения водоемов зоны ЧАЭС [14].

Согласно последним оценкам, нижний предел безопасных доз ионизирующей радиации для биотических сообществ пресных водоемов составляет 240 мкГр·сутки⁻¹ [26]. Полученные нами данные значения МПД существенно ниже этого предела (табл. 3). Тем не менее, подобные дозы могут вызывать определенные изменения на молекулярно-генетическом уровне [3; 27], что способствует постепенному накоплению сублетальных мутаций в последовательных поколениях. При этом ^{241}Am наряду с радиологическим эффектом обладает также высокой хемотоксичностью [28]. Поэтому в среднесрочной перспективе ^{241}Am будет оказывать все большее негативное воздействие на сообщества макрофитов как основы трофических цепей для всей биоты водоемов, что отразится на состоянии всей экосистемы. Следовательно, дальнейшее изучение закономерностей биологической миграции ^{241}Am и в водоемах зоны ЧАЭС и вызываемых им биологических эффектов для организмов биоты является актуальной задачей.

Библиографические ссылки

1. Галочкина ОМ и др. Подходы к проведению картирования территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. *Экологический вестник*. 2008;1(4):31–38.

2. Гудков ДИ. *Радіонукліди в компонентах водних екосистем зони відчуження Чорнобильської АЕС: розподіл, міграція, дозові навантаження, біологічні ефекти* [автореферат дисертації]. Київ: [б. и.]; 2006. 37 с.
3. Гудков ДИ и др. Пресноводные моллюски в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС: динамика содержания радионуклидов, дозовые нагрузки, цитогенетические и гематологические исследования. *Гидробиологический журнал*. 2010;46(3):86–104.
4. Golubev A, Sikorski V, Stoliar O. Ionizing radiation long-term impact on biota in water bodies with different levels radioactive contamination in Belarusian sector of Chernobyl nuclear accident zone. *Radioprotection*. 2011;46(6):393–399.
5. Zotina TA, et al. Accumulation of ^{241}Am by crucian carp from food and water. *Doklady Biological Sciences*. 2011;439:248–252.
6. Голубев АП и др. Динамика радиоактивного загрязнения экосистем разнотипных водоемов белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2007;47(3):322–332.
7. Голубев АП и др. Современное состояние радиоактивного загрязнения экосистем водоемов белорусского сектора зоны ЧАЭС. *Вестник Мазырскага дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта імя І. П. Шамякіна*. 2009;2(23):15–19.
8. Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standards. Technical Report. Vienna: IAEA; 1992. p. 332.
9. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety Reports. Vienna: IAEA; 2001. p. 19.
10. Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Radionuclides for Biota in the Marine Environment. Technical Reports. Vienna: IAEA; 2004. p. 422.
11. Гудков ДИ и др. Радионуклиды ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в компонентах озерных экосистем Красненской поймы р. Припять. *Гидробиологический журнал*. 2005;41(1):76–91.
12. Зарубин ОЛ і інші. Особливості радіоактивного забруднення біоти деяких прісноводних водоемів України. *Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення*. 2003;22:33–43.
13. Пяткова СВ, Горшкова ТА, Сынзыныс БИ. *Экосистемное нормирование*. Обнинск: Обнинский государственный технический университет атомной энергетики; 2007. с. 68.
14. Germenchuk MG, Zhuravkov VV. Retrospective assessment and modelling of radioactive contamination of the territory of the Republic of Belarus as a result of the disaster at the Chernobyl NPP. *Journal of Belarusian State University. Ecology*. 2022;1:56–67.
15. Сытник ЮМ. *Накопление стронция-90 и цезия-137 в экосистеме Кулийской бухты Дуная* [автореферат дисертації]. Киев: [б. и.]; 1992. 20 с.
16. Golubev A, Afonin V, Maksimova S, Androsov V. The current state of pond snail *Lymnaea stagnalis* populations from water reservoirs of the Chernobyl nuclear accident zone. *Radioprotection*. 2005;1(40):511–517.
17. Конопля ЕФ, Миронов ВП, Журавков ВВ. *Радиация и Чернобыль: трансурановые элементы на территории Беларуси*. Минск: Белорусская наука; 2006. с. 191.
18. Алимов АС. *Введение в продукционную экологию*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1989. с. 152.
19. Miramand P, Guary JC. Association of Americium-241 with adenochromes in the branchial hearts of the cephalopod *Octopus vulgaris*. *Marine Ecology – Progress Series*. 1984;4:127–129.
20. Третьякевич СС, Голубев АП. Реконструкция многолетней динамики доз внешнего γ -облучения у большого прудовика *Lymnaea stagnalis* в озере Персток (зона ЧАЭС). В: *Международный симпозиум «Актуальные проблемы дозиметрии»*. Минск: [б. и.]; 2005. 179–182 с.
21. Лысцов ВН и др. Оценка дозовых нагрузок гидробионтов водоема-охладителя Чернобыльской АЭС в 1989 г. В: *Международная конференция «Биологические и радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской атомной станции»*. Москва: [б. и.]; 1990. с. 107.
22. *Животный мир в зоне аварии Чернобыльской АЭС*. Минск: Наука і тэхніка; 1995. 263 с.
23. Рябов ИН. Оценка воздействия радиоактивного загрязнения на гидробионтов 30-километровой зоны контроля аварии на Чернобыльской АЭС. *Радиобиология*. 1992;32(5):662–666.
24. *Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ)*. Москва: Алана; 2009. с. 68–71.
25. *Научное решение черновильских проблем (основные итоги 2001 года)*. Минск: [б. и.]; 2002. с. 44.
26. Andersson P, et al. Numerical benchmarks for protecting biota against radiation in the environment: proposed levels and underlying reasoning. *Swedish Radiation Protection Authority*. 2008. p. 48.
27. Цыцугина ВГ, Поликарпов ГГ. Цитогенетические и популяционные эффекты у олигохет Чернобыльской зоны. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2000;40(2):226–230.
28. Toxicological profile for americium. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta: [publisher unknown]; 2004. p. 333.

References

1. Galochkina OM et al. *Podkhody k provedeniiu kartirovaniia territorii Polesskogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika* [Approaches to Carrying out Mapping of the Territory of the Polessky State Radiation-Ecological Reserve]. *Ekologicheskii vestnik*. 2008;1(4):31–38. Russian.
2. Hudkov DI. *Radionuklidy v komponentakh vodnykh ekosystem zony vidchuzhennia Chornobylskoi AES: rozpodil, mihratsiia, dozovi navantazhennia, biolohichni efekty*. [Radionuclides in the components of the water ecosystems of the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant: distribution, migration, dose loads, biological effects] [PhD thesis]. Kyiv: [publisher unknown]; 2006. 37 p. Ukrainian.
3. Gudkov DI, et al. *Presnovodnye molliuski v zone otchuzhdeniia Chernobylskoi AES: dinamika sodержaniia radionuklidov, dozovye nagruzki, tsitogeneticheskie i gematologicheskie issledovaniia* [Freshwater mollusks in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant: dynamics of radionuclide content, dose loads, cytogenetic and hematological studies]. *Gidrobiologicheskii zhurnal*. 2010;46(3):86–104. Russian.
4. Golubev A, Sikorski V, Stoliar O. Ionizing radiation long-term impact on biota in water bodies with different levels radioactive contamination in Belarusian sector of Chernobyl nuclear accident zone. *Radioprotection*. 2011;46(6):393–399.
5. Zotina TA, et al. Accumulation of ^{241}Am by crucian carp from food and water. *Doklady Biological Sciences*. 2011;439:248–252.

6. Golubev AP, et al. *Dinamika radioaktivnogo zagriazneniia ekosistem raznotipnykh vodoemov belorusskogo sektora zony otchuzhdeniia Chernobyl'skoi AES* [Dynamics of radioactive contamination of ecosystems of different types of water bodies in the Belarusian sector of the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant]. *Radiatsionnaia biologii. Radioekologiya*. 2007;47(3):322–332. Russian.
7. Golubev AP, et al. *Sovremennoe sostoianie radioaktivnogo zagriazneniia ekosistem vodoemov belorusskogo sektora zony ChAES* [The current state of radioactive contamination of ecosystems of water bodies in the Belarusian sector of the Chernobyl zone]. *Vesnik Mazyr'skago dzharzhavnaga pedagogichnago universiteta imia I. P. Shamiakina*. 2009;2(23):15–19. Russian.
8. Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standards. Technical Report. Vienna: IAEA; 1992. p. 332.
9. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety Reports. Vienna: IAEA; 2001. p. 19.
10. Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Radionuclides for Biota in the Marine Environment. Technical Reports. Vienna: IAEA; 2004. p. 422.
11. Gudkov DI, et al. *Radionuklidy ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu i ²⁴¹Am v komponentakh ozernykh ekosistem Krasnenskoj poimy r. Pripiati* [Radionuclides ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu and ²⁴¹Am in the components of lake ecosystems of the Krasnenskaya floodplain of the river Pripyat]. *Gidrobiologicheskij zhurnal*. 2005;41(1):76–91. Russian.
12. Zarubin OL, et al. *Osoblyvosti radioaktyvnoho zabrudnennia bioty deiaknykh priysnovodnykh vodoim Ukrainy* [Features of radioactive contamination of biota of some freshwater bodies of Ukraine]. *Biulleten ekolohichnogo stanu zony vidchuzhdeniia ta zony bezumovnoho (oboviazkovo) vidseleunia*. 2003;22:33–43. Ukrainian.
13. Piatkova SV, Gorshkova TA, Synzynys BI. *Ekosistemnoe normirovanie* [Ecosystem rationing]. Obninsk: Obninskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet atomnoi energetiki; 2007. p. 68. Russian.
14. Germenchuk MG, Zhuravkov VV. Retrospective assessment and modelling of radioactive contamination of the territory of the Republic of Belarus as a result of the disaster at the Chernobyl NPP. *Journal of Belarusian State University. Ecology*. 2022;1:56–67.
15. Sytnik IuM. *Nakoplenie strontsiia-90 i tseziia-137 v ekosisteme Kiliiskoi bukhty Dunaia*. [Accumulation of Strontium-90 and Cesium-137 in the Ecosystem of the Kiliya Bay of the Danube] [PhD thesis]. Kyiv: [publisher unknown]; 1992. 20 p. Russian.
16. Golubev A, Afonin V, Maksimova S, Androsov V. The current state of pond snail *Lymnaea stagnalis* populations from water reservoirs of the Chernobyl nuclear accident zone. *Radioprotection*. 2005;1(40):511–517.
17. Konoplia EF, Mironov VP, Zhuravkov VV. *Radiatsiia i Chernobyl: transuranovye elementy na territorii Belarusi* [Radiation and Chernobyl: transuranic elements on the territory of Belarus]. Minsk: Belorusskaia nauka; 2006. p. 191. Russian.
18. Alimov AS. *Vvedenie v produktsionnuu ekologiiu* [Introduction to production ecology]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1989. p. 152. Russian.
19. Miramand P, Guary JC. Association of Americium-241 with adenochromes in the branchial hearts of the cephalopod *Octopus vulgaris*. *Marine Ecology – Progress Series*. 1984;4:127–129.
20. Tretiakovich SS, Golubev AP. *Rekonstruktsiia mnogoletnei dinamiki doz vneshnego γ-obluchenii u bolshogo prudovika Lymnaea stagnalis v ozere Perstok (zona ChAES)* [Reconstruction of the long-term dynamics of external γ-irradiation doses in the large pond snail *Lymnaea stagnalis* in Lake Perstok (Chernobyl zone)]. In: *Mezhdunarodnyi simpozium «Aktualnye problemy dozimetrii»*. Minsk: [publisher unknown]; 2005. p. 179–182. Russian.
21. Lystsov VN, et al. *Otsenka dozovykh nagruzok gidrobiontov vodoema-okhladitel'ia Chernobyl'skoi AES v 1989 g.* [Estimation of Dose Loads of Hydrobionts in the Cooling Pond of the Chernobyl Nuclear Power Plant in 1989]. In: *I Mezhdunarodnaia konferentsiia «Biologicheskie i radioekologicheskie posledstviia avarii na Chernobyl'skoi atomnoi stantsii»*. Moscow: [publisher unknown]; 1990. p. 107. Russian.
22. *Zhivotnyi mir v zone avarii Chernobyl'skoi AES* [Fauna in the Chernobyl accident zone]. Minsk: Navuka i tekhnika; 1995. p. 263. Russian.
23. Ryabov IN. *Ocenka vozdeystviia radioaktivnogo zagriazneniia na gidrobiontov 30-kilometrovj zony kontrolya avarii na Chernobyl'skoi AES* [Assessment of the impact of radioactive contamination on hydrobionts of the 30-kilometer control zone of the accident at the Chernobyl NPP]. *Radiobiologiya*. 1992; 32(5):662–666. Russian.
24. *Publikatsiia 103 Mezhdunarodnoi Komissii po radiatsionnoi zashchite (MKRZ)* [103th International Commission on Radiation Protection Publication]. Moscow: Alana; 2009. p. 68–71. Russian.
25. *Nauchnoe reshenie chernobyl'skikh problem (osnovnye itogi 2001 goda)* [Scientific solution of Chernobyl problems (main results of 2001)]. Minsk: [publisher unknown]; 2002. p. 44. Russian.
26. Andersson P, et al. Numerical benchmarks for protecting biota against radiation in the environment: proposed levels and underlying reasoning. *Swedish Radiation Protection Authority*. 2008. p. 48.
27. Tsytsugina VG, Polikarpov GG. *Tsitogeneticheskie i populatsionnye efekty u oligokhet Chernobyl'skoi zony* [Cytogenetic and population effects in oligochaetes of the Chernobyl zone]. *Radiatsionnaia biologii. Radioekologiya*. 2000;40(2): 226–230. Russian.
28. Toxicological profile for americium. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta: [publisher unknown]; 2004. p. 333.

Статья поступила в редколлегию 08.11.2022.
Received by editorial board 08.11.2022.

УДК 614.876.06:621.039.58

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ БЕЛАРУСИ ВСЛЕДСТВИЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА 2021–2025 ГГ.

Л. Н. ЭВЕНТОВА¹⁾, А. Н. МАТАРАС¹⁾, А. Н. БАТЯН²⁾, Н. Г. ВЛАСОВА^{1), 3)}, Ю. В. ВИСЕНБЕРГ³⁾

¹⁾Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека,
ул. Ильича, 290, 246040, г. Гомель, Беларусь

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

³⁾Гомельский государственный медицинский университет,
ул. Ланге, 5, 246050, г. Гомель, Беларусь

В соответствии с Законами Республики Беларусь «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС» от 06.01.2009 г. и «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС» от 26.05.2012 г., величина средней годовой эффективной дозы облучения жителей является одним из показателей радиационной обстановки в населенных пунктах, подвергшихся загрязнению радионуклидами в результате аварии на ЧАЭС. Цель исследования: актуализировать метод оценки доз облучения населения в ситуации существующего облучения после аварии на ЧАЭС и на его основе провести оценку средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь вследствие аварии на Чернобыльской АЭС на период 2021–2025 гг. С учетом международных рекомендаций в области радиационной защиты, изменений в радиационной обстановке в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии и накопленных новых данных индивидуальной дозиметрии внутреннего облучения населения по результатам проведения измерений на спектрометре излучения человека актуализирован метод оценки средних годовых эффективных доз внешнего и внутреннего облучения жителей радиоактивно загрязненных населенных пунктов Республики Беларусь.

Проведена оценка средних годовых эффективных доз облучения населения Республики Беларусь, проживающего на территории радиоактивного загрязнения, и по ее результатам составлен Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей 2193 населенных пунктов на 2021–2025 гг. Согласно данным составленного Каталога средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь, из 2193 населенных пунктов в 29 суммарная эффективная доза облучения может превысить 1 мЗв/год, кроме того, в 5 населенных пунктах она составляет около 1 мЗв/год. Ни в одном из них средняя годовая эффективная доза облучения не может превысить 5 мЗв/год. Данные Каталога средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения

Образец цитирования:

Эвентова ЛН, Матарас АН, Батян АН, Власова НГ, Висенберг ЮВ. Дозы облучения населения Беларуси вследствие аварии на Чернобыльской атомной электростанции на 2021–2025 гг. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;4:70–78.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-70-78>

For citation:

Eventova LN, Mataras AN, Batyan AN, Vlasova NG, Visenberg YuV. 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. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-70-78>

Авторы:

Людмила Николаевна Эвентова – научный сотрудник лаборатории радиационной защиты научного отдела.

Анастасия Николаевна Матарас – научный сотрудник лаборатории радиационной защиты научного отдела.

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

Наталья Генриховна Власова – доктор биологических наук, профессор; заведующий лабораторией радиационной защиты научного отдела¹; профессор кафедры экологической и профилактической медицины³.

Юлия Валерьевна Висенберг – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры нормальной и патологической физиологии.

Authors:

Ludmila N. Eventova, researcher at the laboratory of radiation protection of the science department.

ludeven@mail.ru

Anastasia N. Mataras, researcher at the laboratory of radiation protection of the science department.

ma-na77@mail.ru

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

giv@iseu.by

Natalya G. Vlasova, doctor of science (biology), full professor; head of the laboratory of radiation protection of the science department^a; professor at the department of ecological and preventive medicine^c.

Natalie.Vlasova@mail.ru

Yulia V. Visenberg, PhD (biology), docent; associate professor at the department of normal and pathological physiology.

visenyu@gmail.com

Республики Беларусь, действующего на период 2021–2025 гг., наряду с данными о плотности загрязнения территорий Республики Беларусь долгоживущими радионуклидами, применены для составления Перечня населенных пунктов и объектов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, и принятия Постановления Совета Министров Республики Беларусь об отнесении населенных пунктов к соответствующим зонам радиоактивного загрязнения.

Ключевые слова: доза внутреннего облучения; доза внешнего облучения; средняя годовая эффективная доза облучения; населенный пункт; репрезентативное лицо.

EXPOSURE DOSES TO THE POPULATION OF BELARUS FROM THE CHERNOBYL ACCIDENT IN 2021–2025

L. N. EVENTOVA^a, A. N. MATARAS^b, A. N. BATYAN^b, N. G. VLASOVA^{a,c}, Yu. V. VISENBERG^c

^aRepublican Research Center for Radiation Medicine and Human Ecology,
290 Ilyicha Street, Gomel 246040, Belarus

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

^cGomel State Medical University,
5 Lange Street, Gomel 246050, Belarus

Corresponding author: L. N. Eventova (ludeven@mail.ru)

In accordance with the Laws of the Republic of Belarus «On the social protection of citizens affected by the accident at the Chernobyl NPP» dated January 6, 2009 and «On the legal regime of territories exposed to radioactive contamination due to the accident at the Chernobyl NPP» dated May 26, 2012, the value of the average annual effective dose of exposure to residents is one of the indicators of the radiation situation in settlements contaminated with radionuclides as a result of the Chernobyl accident. The objective: to update the method for assessing the exposure doses to the population in the situation of existing exposure after the Chernobyl accident and, on its basis, to assess the average annual effective exposure dose to residents of settlements of the Republic of Belarus due to the Chernobyl accident for the period 2021–2025. The method for estimating the average annual effective doses due to external and internal irradiation to residents of radioactively contaminated settlements of the Republic of Belarus has been improved taking into account international recommendations in the field of radiation protection, changes in the radiation situation in the long-time period after the Chernobyl accident and the new data on individual dosimetry of internal exposure to the population based on the results of whole-body counter (WBC) measurements. An assessment of the average annual effective exposure doses to the population of the Republic of Belarus residing in the territory of radioactive contamination was carried out, and based on its results, the Catalog of average annual effective exposure doses to residents of 2193 settlements for the period 2021–2025 was compiled. According to the compiled Catalog of average annual effective exposure doses to residents of settlements located on the territory of radioactive contamination of the Republic of Belarus, in 29 settlements out of 2193, the total effective exposure dose can exceed 1 mSv/year, in addition, it is about 1 mSv/year in 5 settlements. In none of the settlements, the average annual effective radiation dose can exceed 5 mSv/year. Valid for the period 2021–2025 Catalog of average annual effective exposure doses to the residents of settlements located on the territory of radioactive contamination of the Republic of Belarus, along with data on the density of contamination of the territories of the Republic of Belarus with long-lived radionuclides, was used to compile the List of settlements and objects located in the zones of radioactive contamination, and to adopt a Resolution of the Council of Ministers of the Republic Belarus on designation of settlements to the corresponding zones of radioactive contamination.

Keywords: internal exposure dose; external exposure dose; average annual effective exposure dose; settlement, representative person.

Введение

В соответствии с законодательством Республики Беларусь по обеспечению радиационной безопасности населения, начиная с 1992 г. составлялись Каталоги средней годовой эффективной дозы облучения населения, действующие сроком на пять лет. Данные Каталога средней годовой эффективной дозы облучения населения и средняя плотность загрязнения территории населенного пункта радионуклидами цезия-137, стронция-90 и плутония -238, -239, -240 являются показателями для отнесения населенных пунктов к зонам радиоактивного загрязнения. В Публикации № 60 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) подчеркивается, что оценка доз облучения фундаментальна для радиационной защиты [1], хотя ни одну дозу в органе или ткани (эквивалентную дозу), ни эффективную дозу невозможно измерять непосредственно. Для проведения любых оценок доз облучения необходимо использовать элементы моделирования.

До 2008 г. в методах, на основе которых проводили расчет доз для Каталога, оценка средней годовой эффективной дозы внутреннего облучения базировалась на поступлении ¹³⁷Cs в организм человека

с молоком, моделирующим все потребляемые мясомолочные продукты, и картофелем, моделирующим все потребляемые растительные продукты. С 2008 г. для оценки средней годовой эффективной дозы внутреннего облучения населения применяют метод, базирующийся на основании результатов прямых измерений на спектрометре излучения человека (СИЧ).

С учетом современной радиационной обстановки, накопленных новых данных индивидуальной дозиметрии внутреннего облучения населения по результатам СИЧ-измерений, а также для приведения метода в соответствие с международными рекомендациями в области радиационной безопасности возникла необходимость во внесении корректирующих изменений в метод оценки доз облучения.

Дозы внешнего и внутреннего облучения населения, проживающего на загрязненных черномыльскими радионуклидами территориях, формируются в основном за счет содержания цезия-137 в объектах окружающей среды и его поступления в организм человека с пищевыми продуктами местного произрастания и производства. Вклад других долгоживущих радионуклидов (стронция-90 и плутония-238, -239, -240) в среднюю годовую эффективную дозу облучения жителей населенных пунктов, расположенных на загрязненных территориях, невелик и не учитывается.

Цель исследования: актуализировать метод оценки доз облучения населения в ситуации существующего облучения после аварии на ЧАЭС и на его основе провести оценку средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь вследствие аварии на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 гг.

Задачи исследования: с учетом международных рекомендаций в области радиационной безопасности внести корректирующие изменения в параметры метода оценки доз облучения населения в соответствии с изменениями в радиационной обстановке в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии и накопленными новыми данными индивидуальной дозиметрии внутреннего облучения населения по результатам СИЧ-измерений.

Материалы и методы исследования

Материалы для проведения исследования:

– данные Государственного дозиметрического регистра о дозах внутреннего облучения, рассчитанных по результатам СИЧ-измерений 140 тыс. жителей Гомельской обл. за 2016–2018 гг.;

– данные прогноза Государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (Белгидромет) Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь о средних плотностях загрязнения территории населенных пунктов цезием-137 на 2021 г.;

– данные по типу населенного пункта.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакета программ статистического анализа *STATISTICA 8.0* и *MS EXCEL 2010*.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно Публикации № 103 МКРЗ для отдаленного периода после аварии введено понятие «ситуация существующего облучения» [2]. В этих условиях, в соответствии с требованиями Публикации № 101 МКРЗ, оценка доз облучения жителей населенных пунктов, находящихся на территории радиоактивного загрязнения, проводится в отношении репрезентативного лица, которое является представительным индивидуумом среди жителей населенного пункта, наиболее подвергшихся облучению [3]. Доза облучения репрезентативного лица есть ничто иное, как средняя доза облучения лиц критической группы, которая составляет в среднем 10 % (± 5 %) наиболее облучаемых лиц среди жителей населенного пункта.

Средняя годовая эффективная доза облучения жителей населенных пунктов, подвергшихся воздействию радиоактивного загрязнения в результате аварии на ЧАЭС, определяется суммарно дозой внешнего облучения репрезентативного лица от цезия-137, находящегося в почве, и дозой внутреннего облучения репрезентативного лица от поступившего в организм человека цезия-137 с пищей и водой:

$$E = E_{RP}^{ext} + E_{RP}^{int}, \quad (1)$$

где E_{RP}^{ext} – годовая эффективная доза внешнего облучения репрезентативного лица, мЗв/год;

E_{RP}^{int} – годовая эффективная доза внутреннего облучения репрезентативного лица, мЗв/год.

Наиболее точный метод оценки средней годовой дозы внешнего облучения в населенных пунктах разного типа – метод индивидуального дозиметрического контроля с использованием термолюминесцентной дозиметрии, либо измерения мощности дозы в локациях. Но этот метод целесообразно использовать только в условиях плотности загрязнения территории цезием выше 444 кБк/м². По данным ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды»

Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, в 2021 г. таких населенных пунктов насчитывалось всего 13.

Для оценки эффективной дозы внешнего облучения репрезентативного лица применили расчетный метод с использованием эмпирического коэффициента связи средней эффективной дозы внешнего облучения с плотностью загрязнения территории населенного пункта цезием-137:

$$E_{RP}^{ext} = KF_s \cdot \sigma_{CS}, \quad (2)$$

где KF_s – коэффициент связи годовой эффективной дозы репрезентативного лица населенного пункта типа s со средней плотностью загрязнения территории населенного пункта цезием-137, мЗв*год⁻¹/кБк*м⁻² (мЗв*год⁻¹/Ки*км⁻²);

σ_{CS} – средняя плотность загрязнения территории населенного пункта цезием-137 на 2021 год, кБк/м² (Ки/км²).

Коэффициент связи средней эффективной дозы внешнего облучения с плотностью загрязнения территории населенного пункта цезием-137 рассчитан для населенных пунктов различного типа (село, городской поселок, город) по результатам индивидуального дозиметрического контроля методом термoluminescentной дозиметрии у представителей наиболее облучаемой группы среди жителей соответствующих населенных пунктов за период 1991–2008 гг. и экстраполирован на период до 2021 г.

Значения коэффициента связи дозы внешнего облучения с плотностью загрязнения территории цезием-137 для трех типов населенных пунктов, полученные в результате экстраполяции, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента KF_s для расчета годовой эффективной дозы внешнего облучения репрезентативного лица населенного пункта соответствующего типа

Table 1

Values of the KF_s coefficient for calculating the annual effective external exposure dose to a representative resident of a settlement of the corresponding type

Коэффициент	Тип населенного пункта		
	сельский	поселковый	городской
KF_s , мЗв/кБк·м ⁻²	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$
KF_s , мЗв/Ки·км ⁻²	0,049	0,027	0,021

Оценка годовых эффективных доз внутреннего облучения репрезентативного лица основывается на использовании результатов индивидуального контроля внутреннего облучения населения, полученных при проведении СИЧ-измерений, как наиболее достоверных и надежных.

При наличии достаточного количества СИЧ-измерений содержания цезия-137 в организме жителей конкретного населенного пункта за один из последних трех лет или за три года, годовая эффективная доза внутреннего облучения репрезентативного лица населенного пункта рассчитывается по формуле:

$$E_{RP}^{int} = \frac{1}{n} \sum_i E_i^{int}, \quad (3)$$

где n – численность наиболее облучаемой группы лиц из числа обследуемых жителей населенного пункта;

E_i^{int} – эффективная доза внутреннего облучения i -го лица наиболее облучаемой группы среди жителей населенного пункта, рассчитанная по результатам СИЧ-измерений, мЗв/год.

В табл. 2 представлен критерий достаточности объема СИЧ-измерений содержания цезия-137 в организме жителей населенного пункта при определенной численности населения.

Таблица 2

Объем выборки с доверительной вероятностью 0,95 для корректной оценки доз облучения жителей населенного пункта

Table 2

Sample size with a confidence coefficient of 0.95 for a correct assessment of exposure doses to residents of a settlement

Количество жителей в населенном пункте	<100	100–1000	1000–10000	>10000
Объем выборки	Не менее 85 % от общей численности	Не менее 40 % от общей численности	Не менее 10 % от общей численности	680 человек

В случае отсутствия либо недостатка данных СИЧ-измерений для оценки дозы внутреннего облучения репрезентативного лица применяют расчетную модель¹, разработанную в 2008 г., с внесенными в нее корректирующими изменениями расчетных параметров, которые соответствуют периоду 2021–2025 гг.

Для приведения расчетных параметров модели в соответствие с радиационной обстановкой настоящего времени были использованы 140 тыс. СИЧ-измерений за период 2016–2018 гг. у жителей 388 сельских населенных пунктов Гомельской обл. Из этого количества 26 тыс. измерений наиболее облучаемой части жителей населенных пунктов составили обучающую выборку. В соответствии с классификацией [4], по факторам, оказывающим влияние на формирование дозы внутреннего облучения, населенные пункты обучающей выборки, подобно населенным пунктам Республики Беларусь, подвергшимся радиоактивному загрязнению и подлежащим зонированию, распределили на три региона, различающиеся по радиоэкологическим и социальным параметрам:

– Центральный регион, в него вошли Брагинский, Житковичский, Калинковичский, Мозырьский, Речицкий, Рогачевский, Петриковский, Светлогорский и Хойникский р-ны;

– Северо-Восточный регион, в него вошли Буда-Кошелевский, Ветковский, Гомельский, Добрушский, Жлобинский, Кормянский, Лоевский и Чечерский р-ны;

– Полесский регион, в него вошли Ельский, Лельчицкий и Наровлянский р-ны.

Для каждого региона была построена регрессионная зависимость годовой эффективной дозы внутреннего облучения репрезентативного лица от средней плотности загрязнения территории населенного пункта цезием-137, позволяющая провести расчет дозы внутреннего облучения репрезентативного лица населенных пунктов Беларуси, подлежащих зонированию.

При отсутствии или недостаточности результатов СИЧ-измерений годовая эффективная доза внутреннего облучения репрезентативного лица населенного пункта рассчитывается по уравнению линейной регрессии вида:

$$E_{RP}^{int} = a + b \cdot \sigma_{cs}, \quad (4)$$

где E_{RP}^{int} – годовая эффективная доза внутреннего облучения репрезентативного лица;

a – свободный член уравнения регрессии, эмпирически полученный для каждого региона, значения которого представлены в табл. 3, мЗв/год;

b – коэффициент регрессии, определяющий связь годовой эффективной дозы внутреннего облучения репрезентативного лица со средней плотностью загрязнения территории населенного пункта цезием-137, мЗв*год⁻¹/кБк*м⁻² (мЗв*год⁻¹/Ки*км⁻²);

σ_{cs} – средняя плотность загрязнения территории населенного пункта цезием-137 на 2021 год, кБк/м² (Ки/км²).

В табл. 3 приводятся значения расчетных параметров уравнения линейной регрессии для населенных пунктов 3-х регионов, различающихся по радиоэкологическим параметрам.

Таблица 3

Параметры уравнения линейной регрессии для 3-х регионов

Table 3

Parameters of the linear regression equation for 3 regions

Регион	Параметры уравнения $y = a + bx$		Коэффициент корреляции
	a	b	
Полесский	0,1560	0,0020	0,98
Центральный	0,0587	0,0003	0,95
Северо-Восточный	0,0280	0,0005	0,96

Для оценки качества модели из трех регионов сформировали контрольную выборку из 44 населенных пунктов Гомельской обл., которые не были включены в выборку для разработки модели. Количество населенных пунктов контрольной выборки по каждому региону представлено в табл. 4.

¹ГР № 20082092. Создать Каталог среднегодовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения: отчет о НИР (заключительный) // Научное обеспечение решения медицинских проблем последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС / ГУ «РНПЦ РМ и ЭЧ»; рук. Н. Г. Власова; исполн.: Л. А. Чунихин [и др.]. Гомель, 2008. 118 с.

Количество населенных пунктов, вошедших в контрольную выборку

Table 4

Number of settlements included into the control sample

Регион	Количество населенных пунктов
Полесский	12
Центральный	22
Северо-Восточный	10
Всего	44

Населенные пункты контрольной выборки отбирались в соответствии со следующими условиями:

- общее количество СИЧ-измерений за период 2016–2018 гг. должно составлять ~50 % от числа жителей населенного пункта;
- наличие результатов СИЧ-измерений в каждом из трех лет;
- количество результатов СИЧ-измерений должно быть достаточным для получения статистически достоверных результатов (см. табл. 2);
- населенные пункты должны различаться по числу жителей, экологическим условиям и географическому местоположению.

Проведен сравнительный анализ доз внутреннего облучения репрезентативного лица, рассчитанных по модели и по результатам СИЧ-измерений.

В табл. 5 представлены результаты сравнения модельных оценок доз внутреннего облучения с таковыми, рассчитанными по результатам СИЧ-измерений.

Сравнительный анализ доз внутреннего облучения репрезентативного лица, рассчитанных по модели и по результатам СИЧ-измерений, показал, что в целом по населенным пунктам трех регионов, расположенных на территориях с различной плотностью загрязнения, наблюдается хорошая сходимость результатов.

Ошибка прогноза по модели составила 21 %, что свидетельствует об адекватности и высокой точности метода.

Усовершенствованный метод оценки средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на загрязненных территориях, с откорректированными расчетными параметрами, описан в Инструкции по применению «Метод оценки средних годовых эффективных доз облучения населения»².

В соответствии с Инструкцией проведена оценка годовых эффективных доз внешнего, внутреннего облучения и суммарных эффективных доз облучения репрезентативного лица среди жителей 2193 населенных пунктов Беларуси, подлежащих зонированию. По итогам оценки составлен Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь³, сроком действия на 2021–2025 гг.

По данным созданного Каталога доз⁴, проведен анализ годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения.

Результат анализа данных Каталога⁵ следующий: из 2193 населенных пунктов, находящихся на территории радиоактивного загрязнения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, в 2159 из них суммарная годовая эффективная доза облучения меньше уровня в 1 мЗв/год. В 29 населенных пунктах суммарная годовая эффективная доза облучения может превысить 1 мЗв/год, кроме того, в 5 из них она ~1 мЗв/год (0,96 мЗв/год и выше). При этом 31 населенный пункт находится в Гомельской и 3 – в Могилевской областях, в которых проживает 2406 чел.

В табл. 6 представлено распределение населенных пунктов и численности населения в них по дозовым диапазонам, близким к 1 мЗв/год.

²Метод оценки средних годовых эффективных доз облучения населения. Инструкция по применению. Утверждено Министерством здравоохранения Республики Беларусь 06.12.2019 г. № 117–0919. Гомель, 2019.

³Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь. Утвержден Министерством здравоохранения Республики Беларусь 10.04.2020 г. Минск, 2020.

⁴Там же.

⁵Там же.

Средние годовые дозы внутреннего облучения репрезентативного лица населенных пунктов контрольной группы, рассчитанные по модели и по результатам СИЧ-измерений

Table 5

Average annual doses of internal exposure of a representative resident of the control group, calculated from the model and from the results of WBC measurements

Район	Населенный пункт	Численность населения	Плотность загрязнения ^{137}Cs , кБк/м ²	Средняя доза внутреннего облучения, мЗв/год		Ошибка оценки модели, %
				по модели	по СИЧ	
Брагинский	Верхние Жары	144	32	0,070	0,075	7
Брагинский	Стежерное	118	81	0,078	0,054	44
Брагинский	Асаревичи	289	60	0,075	0,066	14
Брагинский	Комарин	1777	66	0,076	0,062	23
Брагинский	Теклинов	52	76	0,078	0,076	3
Брагинский	Углы	303	97	0,081	0,083	2
Брагинский	Шкураты	194	142	0,089	0,076	17
Буда-Кошелевс.	Морозовичи	273	61	0,055	0,051	8
Буда-Кошелевс.	Уваровичи	2320	52	0,051	0,043	19
Буда-Кошелевс.	Калинино	553	111	0,076	0,052	46
Буда-Кошелевс.	Широкое	932	139	0,089	0,064	39
Ветковский	Великие Немки	492	188	0,110	0,082	34
Ветковский	Ветка	8394	370	0,189	0,156	21
Ветковский	Старое Село	860	176	0,105	0,117	10
Ветковский	Юрковичи	56	426	0,228	0,177	29
Ветковский	Яново	295	189	0,110	0,081	36
Ельский	Добрынь	670	199	0,436	0,317	38
Ельский	Валавская Рудня	121	208	0,448	0,319	40
Ельский	Скородное	594	161	0,382	0,263	45
Ельский	Старое Высокое	282	83	0,274	0,216	27
Кормянский	Барсуки	469	141	0,090	0,066	36
Лельчицкий	Дуброва	651	50	0,228	0,204	12
Лельчицкий	Чемерное	450	46	0,223	0,239	7
Лельчицкий	Стодоличчи	715	61	0,244	0,205	19
Лельчицкий	Ударное	643	38	0,211	0,215	2
Лоевский	Малиновка	421	161	0,098	0,078	26
Наровлянский	Будки	134	209	0,450	0,316	42
Наровлянский	Демидов	301	223	0,470	0,436	8
Наровлянский	Киров	329	441	0,771	0,599	29
Наровлянский	Завойть	201	324	0,609	0,427	43
Рогачевский	Красница	230	78	0,078	0,065	20
Рогачевский	Хатовня	595	125	0,086	0,065	32
Рогачевский	Ильич	881	126	0,086	0,076	13
Рогачевский	Курганье	525	128	0,087	0,065	34
Рогачевский	Белицк	432	96	0,081	0,065	25
Хоникский	Партизанская	130	72	0,077	0,057	35
Хоникский	Дворище	317	312	0,119	0,115	3
Хоникский	Судково	598	158	0,092	0,071	30
Чечерский	Ботвиново	484	46	0,048	0,043	12
Чечерский	Нисимковичи	290	163	0,099	0,079	25
Чечерский	Ипполитовка	84	315	0,165	0,164	1
Чечерский	Отор	439	217	0,122	0,095	28
Чечерский	Чечерск	8312	223	0,125	0,111	13
Чечерский	Красный Берег	178	281	0,149	0,149	1

Распределение населенных пунктов и численности населения Беларуси по дозовым диапазонам, близким к 1 мЗв/год

Table 6

Distribution of settlements and population of Belarus by dose ranges close to 1 mSv/year

Диапазон средних годовых доз, мЗв/год	Область	Количество населенных пунктов	Численность проживающего населения, чел.
>1	Гомельская	26	2259
	Могилевская	3	2
0,96–0,99	Гомельская	5	145
	Итого	34	2406

Ни в одном из населенных пунктов, находящихся на территории радиоактивного загрязнения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, средняя годовая эффективная доза облучения не превысит 5 мЗв/год.

Сравнение данных Каталога средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь⁶, созданного на 2021–2025 гг., с данными Каталога предыдущего пятилетнего периода⁷, показывает снижение дозы внешнего облучения на 29 %, дозы внутреннего облучения – на 33 %, суммарной дозы облучения – на 31 %.

Заключение

Актуализирован метод оценки средних годовых эффективных доз внешнего и внутреннего облучения жителей радиоактивно загрязненных населенных пунктов Республики Беларусь с учетом международных рекомендаций в области радиационной защиты, изменений в радиационной обстановке в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии и накопленных новых данных индивидуальной дозиметрии внутреннего облучения населения по результатам прямых измерений на СИЧ.

На основании метода проведена оценка доз облучения населения и создан Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей 2193 населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь.

Согласно данным Каталога средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь⁸, из 2193 населенных пунктов в 29 населенных пунктах суммарная эффективная доза облучения может превысить 1 мЗв/год, кроме того, в 5 из них она составляет около 1 мЗв/год. Ни в одном из населенных пунктов средняя годовая эффективная доза облучения не может превысить 5 мЗв/год.

По данным Каталога средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь, составленного на 2021–2025 гг., отмечается снижение доз внешнего и внутреннего облучения населения в сравнении с данными Каталога средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь, составленного на предыдущий пятилетний период 2016–2020 гг.⁹

На основании данных Каталога средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь, разработанного на 2021–2025 гг., а также данных о плотности загрязнения территории Республики Беларусь долгоживущими радионуклидами, составлен Перечень населенных пунктов и объектов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, и принято Постановление Совета Министров Республики Беларусь об отнесении населенных пунктов к соответствующим зонам радиоактивного загрязнения.

⁶Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь. Утвержден Министерством здравоохранения Республики Беларусь 10.04.2020 г. Минск, 2020.

⁷Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, Республики Беларусь. Утвержден Министерством здравоохранения Республики Беларусь 27.03.2015 г. Минск, 2015.

⁸Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь. Утвержден Министерством здравоохранения Республики Беларусь 10.04.2020 г. Минск, 2020.

⁹Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, Республики Беларусь. Утвержден Министерством здравоохранения Республики Беларусь 27.03.2015 г. Минск, 2015.

Библиографические ссылки

1. Кеирим-Маркус ИБ, редактор. *Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990 г. Публикация МКРЗ 60. Часть 2.* Москва: Энергоатомиздат; 1994. 208 с.
2. Киселёв МФ, Шандало НК, редакторы. *Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ).* Москва: Алана; 2009.
3. Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and the Optimisation of Radiological Protection. ICRP Publication 101. *Annals of the ICRP.* 2007. 101 p.
4. Власова НГ, Чунихин ЛА, Дроздов ДН. Статистический анализ результатов СИЧ-измерений для оценки дозы внутреннего облучения сельских жителей в отдаленный период аварии на ЧАЭС. *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2009;4:397–406.

References

1. Keirim-Marcus IB, editor. *Radiatsionnaya bezopasnost. Rekomendatsii MKRZ 1990 g. Publikatsiya MKRZ 60. Chast 2* [Radiation safety. ICRP Recommendations 1990. ICRP Publication 60. Part 2]. Moscow: Energoatomizdat; 1994. Russian.
2. Kiselev MF, Shandalo NK, editors. *Publikatsiya 103 Mezhdunarodnoy Komissii po radiatsionnoy zashchite (MKRZ)* [Publication 103 of the International Commission on Radiation Protection (ICRP)]. Moscow: Alana; 2009. Russian.
3. Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and the Optimisation of Radiological Protection. ICRP Publication 101. *Annals of the ICRP.* 2007. 101 p.
4. Vlasova NG, Chunikhin LA, Drozdov DN. *Statisticheskiy analiz rezul'tatov SICH- izmereniy dlya otsenki dozy vnutrennego oblucheniya sel'skikh zhiteley v otdalenny period avarii na CHAES* [Statistical analysis of the results of measurements on the human radiation spectrometer to assess the internal exposure dose of rural residents in the remote period of the Chernobyl accident]. *Radiation Biology. Radioecology.* 2009;4:397–406. Russian.

Статья поступила в редакцию 19.05.2022.
Received by editorial board 19.05.2022.

УДК 616.34-002:612.112.94

СУБПОПУЛЯЦИИ ЦИРКУЛИРУЮЩИХ $\gamma\delta$ -ЛИМФОЦИТОВ У ПАЦИЕНТОВ С ВОСПАЛИТЕЛЬНЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ КИШЕЧНИКА

Д. Б. НИЖЕГОРОВОДА^{1),2)}, Д. А. ЦЕХАНОВИЧ¹⁾, А. М. СТАРОСТИН²⁾,
О. Г. ДЫБОВ²⁾, А. В. ВОРОБЕЙ²⁾, 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⁾Белорусская медицинская академия последипломного образования,
ул. Петруся Бровки, 3, корп. 3, 220023, г. Минск, Беларусь

Образец цитирования:

Нижегородова ДБ, Цеханович ДА, Старостин АМ, Дыбов ОГ, Воробей АВ, Зафранская ММ. Субпопуляции циркулирующих $\gamma\delta$ -лимфоцитов у пациентов с воспалительными заболеваниями кишечника. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;4:79–88. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-79-88>

For citation:

Nizheharodava DB, Tsekhanovich DA, Starastsin AM, Dybau AG, Vorobei AV, Zafranskaya MM. Circulating $\gamma\delta$ -lymphocytes subsets in patients with inflammatory bowel diseases. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;4:79–88. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-79-88>

Авторы:

Дарья Борисовна Нижегородова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры иммунологии¹⁾; ведущий научный сотрудник отдела иммунологии и биомедицинских технологий²⁾.

Дмитрий Александрович Цеханович – студент кафедры иммунологии.

Андрей Михайлович Старостин – аспирант кафедры хирургии.

Олег Геннадьевич Дыбов – аспирант кафедры хирургии.

Александр Владимирович Воробей – доктор медицинских наук, профессор; заведующий кафедрой хирургии.

Марина Михайловна Зафранская – доктор медицинских наук, доцент; заведующий кафедрой иммунологии¹⁾; главный научный сотрудник отдела иммунологии и биомедицинских технологий²⁾.

Authors:

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

Dmitry A. Tsekhanovich, student at the department of immunology. dima29non@gmail.com

Andrey M. Starastsin, postgraduate student at the department of surgery. dept-surg@hotmail.com

Aleg G. Dybau, postgraduate student at the department of surgery. dept-surg@hotmail.com

Alexander V. Vorobei, doctor of science (medicine), full professor; head of the department of surgery. dept-surg@hotmail.com

Marina M. Zafranskaya, doctor of science (medicine), docent; head of the department of immunology^a; primary investigator at the department of immunology and biomedicine technology^b. zafranskaya@gmail.com

В связи с высоким ростом воспалительных заболеваний кишечника (болезнь Крона, язвенный колит) и на фоне неблагоприятных экологических факторов актуальным остаются исследования иммунопатогенетических механизмов, в том числе Т-клеточной природы, приводящих к повреждению желудочно-кишечного тракта. Особое значение представляют $\gamma\delta$ T-лимфоциты, роль которых в дисрегуляции звеньев врожденного и приобретенного иммунного ответа на комменсальные бактерии у генетически восприимчивых людей до сих пор полностью не изучена. В данном исследовании представлены количественные и функциональные показатели $\gamma\delta$ T-лимфоцитов у пациентов с болезнью Крона и язвенным колитом, свидетельствующие об усилении иммунологического надзора при воспалительных заболеваниях кишечника. В периферической крови пациентов выявлено повышение цитотоксического и активационного фенотипического профиля циркулирующих $\gamma\delta$ T-лимфоцитов, а также перераспределение их состава с выходом в циркуляцию преимущественно ткане-резидентных субпопуляций, что может являться ключевыми звеньями в иммунопатогенезе болезни Крона и язвенного колита. Установленные корреляции с тяжестью заболеваний позволяют использовать фенотипические и функциональные особенности $\gamma\delta$ T-лимфоцитов в качестве диагностических и прогностических маркеров развития аутоиммунного воспаления, при дифференциальной диагностике аутоиммунной патологии, а сами $\gamma\delta$ T-лимфоциты рассматривать как терапевтическую мишень при разработке новых протоколов патогенетической терапии воспалительных заболеваний кишечника.

Ключевые слова: воспалительные заболевания кишечника; аутоиммунная патология; экологический фактор; $\gamma\delta$ T-лимфоциты; проточная цитофлуориметрия.

CIRCULATING $\gamma\delta$ T-LYMPHOCYTES SUBSETS IN PATIENTS WITH INFLAMMATORY BOWEL DISEASES

**D. B. NIZHEHARODAVA^{a, b}, D. A. TSEKHANOVICH^a, A. M. STARASTSIN^b,
A. G. DYBAU^b, A. V. VOROBEL^b, M. M. ZAFRANSKAYA^{a, b}**

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

^bBelarusian Medical Academy of Postgraduate Education
3 Petrusia Broŭki Street, 3 building, Minsk 220013, Belarus
Corresponding author: D. B. Nizheharodava (nzh@tut.by)

Due to the high growth of inflammatory bowel diseases (Crohn's disease and ulcerative colitis) with unfavorable environmental factors in the background, studies of immunopathogenetic mechanisms including T-cells response resulted in gastrointestinal tract damage are of immediate interest. $\gamma\delta$ T-lymphocytes are of particular importance as their role in the dysregulation of the innate and acquired immune response to commensal bacteria in genetically susceptible people has not yet been fully studied. This paper presents the quantitative and functional parameters of $\gamma\delta$ T-lymphocytes in patients with Crohn's disease and ulcerative colitis, indicating an enhancement of immunological surveillance in inflammatory bowel diseases. The increase of the cytotoxic and activation phenotype expression in circulating $\gamma\delta$ T-lymphocytes as well as a redistribution of their composition with dominating of tissue-resident cells subsets were revealed in patients what may be key links in the immunopathogenesis of Crohn's disease and ulcerative colitis. The established correlations with the severity of diseases allow to consider the use of phenotypic and functional $\gamma\delta$ T-lymphocytes features as diagnostic and prognostic markers for the development of autoimmune inflammation as well as for a differential diagnosis of gut autoimmune pathology. While $\gamma\delta$ T-lymphocytes themselves can be used as a therapeutic target in the development of new protocols for the pathogenetic therapy of inflammatory bowel diseases.

Keywords: inflammatory bowel disease; autoimmune pathology; environmental factor; $\gamma\delta$ T-lymphocytes; flow cytometry.

Введение

За последнее десятилетие механизмы, инициирующие аутоиммунные реакции при воспалительных заболеваниях кишечника (ВЗК), остаются не до конца исследованными, в связи с чем актуальным является расширение представлений об иммунопатогенезе ВЗК для улучшения их диагностики и терапии. Согласно классификации к ВЗК относят: болезнь Крона (БК) – идиопатическое хроническое воспалительное заболевание, при котором вовлекается любой отдел желудочно-кишечного тракта (ЖКТ), и язвенный колит (ЯК) – хроническое воспалительное рецидивирующее заболевание толстой кишки с распространением поражения непрерывно от прямой кишки в проксимальном направлении [1]. Среди этиологических факторов ВЗК, наряду с генетической предрасположенностью, ярко выражена роль антропогенного воздействия, включающего влияние неблагоприятной окружающей среды, неправильное питание, длительный прием лекарственных препаратов, вредные привычки, высокий уровень психологического стресса,

нарушение состава микробиоты, инфекции ЖКТ, а также дисрегуляция иммунной системы [2]. При этом экологические факторы играют триггерную роль в инициации и поддержании воспалительной реакции, опосредованной Т-лимфоцитами, в том числе популяцией $\gamma\delta$ Т-лимфоцитов, циркулирующих в крови и преимущественно локализирующихся в периферических лимфоидных органах, главным образом, в слизистой оболочке ЖКТ, которые обладают функциями клеток как врожденного, так и приобретенного иммунитета [3].

В связи с уникальной функциональной пластичностью и иммунорегуляторными свойствами $\gamma\delta$ Т-лимфоциты представляют собой первую линию защиты против инфекционных и опухолевых антигенов, а также участвуют в репарации ткани в ЖКТ посредством синтеза фактора роста кератиноцитов [4]. Показано, что для $\gamma\delta$ Т-лимфоцитов характерен хоуминг в ЖКТ, особенно в условиях микробной стимуляции. В отличие от других ткане-резидентных лимфоцитов интестинальные $\gamma\delta$ Т-клетки способны мигрировать через кишечный эпителий и *lamina propria* посредством окклюдин-зависимого механизма [5] и вовлекаться в прогрессирование заболевания [6]. В ЖКТ $\gamma\delta$ Т-лимфоциты могут распознавать антигены как МНС-зависимым, так и МНС-независимым путем. При этом $\gamma\delta$ Т-лимфоциты активируются микробными антигенами (например, метаболитами изопреноидного биосинтеза, образующиеся в большинстве грамм-негативных бактерий и некоторых грамм-позитивных бактерий), а также собственными антигенными структурами – фосфоантигенами (например, изопентенилпирофосфатом). Иммунорегуляторные функции $\gamma\delta$ Т-лимфоцитов в ЖКТ заключаются в переключении синтеза антител и поддержании продукции иммуноглобулина класса А (IgA), гомеостаза эпителия посредством взаимодействия с $\alpha\beta$ Т-лимфоцитами, эпителиальными клетками и клиренса некротических клеток, а также в участии формирования периферической толерантности за счет синтеза интерлейкина-10 (ИЛ-10). Кроме того, на экспериментальных моделях ВЗК продемонстрирована протективная роль $\gamma\delta$ Т-клеток, характеризующаяся лимитированием воспалительной реакции посредством синтеза противовоспалительных цитокинов, привлечением нейтрофилов в очаг воспаления, а также предотвращением транслокации инвазивных комменсальных и патогенных бактерий через эпителий ЖКТ за счет стимуляции синтеза антимикробных пептидов клетками Панета [7; 8].

Несмотря на то, что экспериментальные исследования подтверждают вовлечение $\gamma\delta$ Т-лимфоцитов в патогенез ВЗК, их клиническое значение до конца не выяснено. В связи с этим в последнее время актуальным стали исследования роли механизмов распознавания и эффекторных реакций врожденного звена иммунитета в инициации и поддержании иммуно-медиированного воспаления и повреждения ткани при ВЗК. В частности, рядом авторов продемонстрирована взаимосвязь развития ВЗК с изменением экспрессии паттерн-распознающих толл-подобных рецепторов (TLRs, toll-like receptors), которые играют фундаментальную роль в распознавании патогенных или стресс-индуцируемых молекул и инициации развития иммунного ответа для осуществления иммунологического надзора в организме, в том числе и ЖКТ. TLRs-медиированные сигнальные пути контролируют не только врожденный клеточный иммунный ответ, но также регулируют работу приобретенного иммунитета, например, активацию Т-лимфоцитов и определяют индивидуальный состав микробиоты ЖКТ. При этом изменения в экспрессии TLRs не только на миелоидных, но и на лимфоидных клетках врожденного иммунитета, в том числе на $\gamma\delta$ Т-лимфоцитах во многом может определять эффективность терапии заболевания [9]. Наряду с этим распознавание активационным рецептором цитотоксичности NKG2D (natural killer group 2 member D, CD314) своих лигандов приводит к функциональной активации интестинальных эффекторных Т-лимфоцитов, экспрессирующих $\gamma\delta$ Т-клеточный рецептор, предполагая их роль в модулировании иммунного ответа в ЖКТ и его дисрегуляции при развитии аутоиммунных и воспалительных заболеваний [10]. Однако фенотипические особенности $\gamma\delta$ Т-лимфоцитов, обладающих цитотоксическим потенциалом, до конца не установлены, как и закономерности формирования их пула клеток-памяти. Кроме того, единичные публикации свидетельствуют о способности $\gamma\delta$ Т-лимфоцитов функционировать в качестве антиген-презентирующих клеток, процессуруя при этом широкий спектр антигенов и праймируя другие лимфоидные клетки [11]. Таким образом, изменение активационного и функционального статуса $\gamma\delta$ Т-лимфоцитов, наряду с реакциями иных лимфоидных и миелоидных клеток, приводит к формированию абберантного иммунного ответа, который может играть решающую роль в развитии ВЗК.

В данной статье представлена характеристика субпопуляционного состава циркулирующих $\gamma\delta$ Т-лимфоцитов, их фенотипических и функциональных особенностей у пациентов с воспалительными заболеваниями кишечника.

Материалы и методы исследования

Материалом исследования явилась периферическая венозная кровь пациентов с ВЗК ($n = 37$): в исследовании включены пациенты с БК и ЯК, которые находились на лечении в хирургическом отделении УЗ «Минская областная клиническая больница». Диагнозы «болезнь Крона» и «язвенный колит» верифицированы

на основании индекса активности БК (Crohn's disease activity index, CDAI) (0 – клиническая ремиссия, 1 – низкая активность, 2 – умеренная активность, 3 – высокая активность) и эндоскопической активности ЯК по балльной шкале Mayo Endoscopic Score (0 – ремиссия, 1 – минимальная активность, 2 – умеренная активность, 3 – выраженная активность) [12]. Группу сравнения составили здоровые доноры, сопоставимые по возрасту и полу (РНПЦ трансфузиологии и медицинских биотехнологий, г. Минск, Республика Беларусь). Клинико-демографическая характеристика исследуемых групп представлена в табл. 1.

Таблица 1

Клинико-демографическая характеристика пациентов с ВЗК и группы сравнения, *Me (25 ÷ 75 %)*

Table 1

Clinical and demographic characteristics of patients with inflammatory bowel diseases and control group, *Me (25 ÷ 75 %)*

Группа	Количество, <i>n</i>	Возраст	Пол, м/ж
Пациенты с БК	27	29,0 [22,0 ÷ 40,0]	21/6
Пациенты с ЯК	10	38,5 [25,0 ÷ 47,5]	5/5
Здоровые доноры	30	36,0 [25,0 ÷ 44,0]	13/17

Метод проточной цитометрии. Субпопуляции Т-лимфоцитов определяли с применением панелей моноклональных антител CD45-FITC/CD4-RD1/CD8-ECD/CD3-PC5, CD45-FITC/CD56-RD1/CD19-ECD/CD3-PC5, $\gamma\delta$ TCR-FITC/ $\alpha\beta$ TCR-PE/HLA-DR-ECD/V δ 1 TCR-PC7/V δ 2 TCR-PB/CD3-APC-A750/CD45-KrO, TLR4-FITC, CD314-PE, CD56-PE, CD45RO-ECD, CD8-PC5, $\gamma\delta$ TCR-PC7 (Beckman Coulter, США) и проточного цитометра CytoFLEX (Beckman Coulter, США). Для иммунофенотипирования 100 мкл цельной крови добавляли в пробирку с моноклональными антителами, перемешивали и инкубировали в течение 15 мин при температуре 18–25 °С. Эритроциты лизировали раствором VersaLyse (Beckman Coulter, США) в течение 10 мин. Результаты регистрировали на проточном цитометре на 1000 $\gamma\delta$ Т-лимфоцитов.

Имуноферментный анализ. Концентрацию общих иммуноглобулинов (Ig) класса М, G, А и Е определяли в сыворотке крови исследуемых групп методом твердофазного иммуноферментного анализа согласно инструкции производителей с использованием коммерческих наборов «Иммуноскрин-G, М, А-ИФА-БЕСТ» (А-8674, Вектор-Бест, РФ) и «IgE общий-ИФА-БЕСТ» (А-8660, Вектор-Бест, РФ). Результаты регистрировали на иммуноферментном анализаторе «Thermo Fischer» (Германия) при $\lambda = 450$ нм с поправкой на $\lambda = 650$ нм.

Статистический анализ. Статистическую обработку данных выполняли в программе *STATISTICA 8.0*. Сравнение независимых групп проводили с использованием непараметрического критерия Манна – Уитни. Корреляционный анализ осуществляли с применением рангового коэффициента корреляции непараметрических данных Спирмена (*R*). За уровень статистической значимости принимали $p < 0,05$ (*) и $p < 0,01$ (**).

Результаты исследования и их обсуждение

Количественная характеристика лимфоидных клеток у пациентов с ВЗК. Для характеристики лимфоидных клеток, циркулирующих в периферической крови пациентов с ВЗК и группы сравнения, исследовано количественное содержание следующих популяций: натуральных киллерных клеток (CD56⁺НК-клетки); CD19⁺В-лимфоцитов; CD3⁺Т-лимфоцитов и их основных субпопуляций, различающихся по экспрессии цепей Т-клеточного рецептора ($\alpha\beta$ Т-клетки и $\gamma\delta$ Т-клетки). Сравнительная характеристика относительного содержания популяций лимфоидных клеток в исследуемых группах представлена в табл. 2.

У пациентов с ВЗК отмечалось снижение количества НК-клеток ($p < 0,05$), вовлекающиеся в механизмы реализации врожденного неспецифического иммунитета, наряду с увеличением Т-лимфоцитов ($p < 0,05$), участвующих в формировании приобретенного специфического клеточного иммунитета, относительно группы сравнения. При этом как у пациентов с БК, так и ЯК общее количество Т-клеток статистически значимо повышалось, главным образом, за счет популяции лимфоцитов, экспрессирующих $\gamma\delta$ Т-клеточный рецептор. В исследуемых группах ВЗК отсутствовали изменения в процентном содержании В-лимфоцитов, но при этом регистрировалось статистически значимое увеличение всех классов сывороточных иммуноглобулинов у пациентов с БК и повышение IgM, IgA, IgE – у пациентов с ЯК относительно группы сравнения (табл. 2).

Таблица 2

Иммунологические показатели периферической крови у пациентов с ВЗК и группы сравнения

Table 2

Immunological parameters in patients with inflammatory bowel disease and comparative group

Иммунологический показатель	Болезнь Крона	Язвенный колит	Группа сравнения	<i>p</i>
CD56 ⁺ NK-клетки, %	7,87 [4,97 ÷ 13,33]	7,22 [5,48 ÷ 11,82]	12,66 [10,97 ÷ 15,56]	<i>p</i> ₁₋₃ < 0,05 <i>p</i> ₂₋₃ < 0,05
CD19 ⁺ В-клетки, %	7,17 [5,38 ÷ 12,25]	7,87 [6,22 ÷ 9,33]	8,94 [7,25 ÷ 12,79]	
CD3 ⁺ Т-клетки, %	81,59 [68,29 ÷ 85,77]	86,00 [71,01 ÷ 86,79]	75,65 [68,90 ÷ 78,69]	<i>p</i> ₁₋₃ < 0,05 <i>p</i> ₂₋₃ < 0,05
αβTCR ⁺ CD3 ⁺ Т-клетки, %	72,51 [57,99 ÷ 79,46]	77,76 [65,30 ÷ 81,98]	70,69 [67,06 ÷ 75,65]	
γδTCR ⁺ CD3 ⁺ Т-клетки, %	6,81 [2,59 ÷ 11,86]	6,31 [3,81 ÷ 11,12]	3,24 [2,16 ÷ 5,32]	<i>p</i> ₁₋₃ < 0,01 <i>p</i> ₂₋₃ < 0,01
IgM, г/л	2,29 [1,69 ÷ 3,50]	2,14 [1,42 ÷ 2,68]	1,20 [0,68 ÷ 1,37]	<i>p</i> ₁₋₃ < 0,001 <i>p</i> ₂₋₃ < 0,01
IgG, г/л	17,85 [11,98 ÷ 23,55]	13,71 [10,34 ÷ 17,69]	13,14 [9,81 ÷ 15,84]	<i>p</i> ₁₋₃ < 0,05
IgA, г/л	3,72 [3,05 ÷ 5,95]	3,91 [3,02 ÷ 4,77]	1,73 [1,30 ÷ 2,78]	<i>p</i> ₁₋₃ < 0,001 <i>p</i> ₂₋₃ < 0,01
IgE, МЕ/л	25,67 [12,20 ÷ 42,93]	15,09 [11,68 ÷ 38,70]	5,75 [2,31 ÷ 18,41]	<i>p</i> ₁₋₃ < 0,0001 <i>p</i> ₂₋₃ < 0,01

Согласно литературным данным, ключевыми участниками патогенеза ВЗК являются Т-лимфоциты и их субпопуляции. Являясь регуляторами воспаления и гомеостаза, Т-клетки поддерживают иммунологическую толерантность в общем иммунологическом профиле слизистой оболочки кишечника, что сопровождается синтезом противовоспалительных цитокинов ИЛ-10 и трансформирующего фактора роста β. Однако при патологическом воздействии, патохимических и патофизиологических условиях происходит нарушение иммунорегуляторных механизмов. Т-клетки непосредственно участвуют в трансмуральном воспалении, инициируя патологический процесс с помощью выделяемых ими медиаторов воспаления и ряда таких эффекторных цитокинов, как γ-интерферона (γИФН) и фактора некроза опухоли α (ФНОα), которые запускают каскадные реакции, вовлекая другие иммунные клетки. Это ведет к развитию гиперстимуляции и аутоиммунной агрессии с преобладанием цитотоксического и провоспалительного микроокружения у пациентов с ВЗК [13].

На основе экспрессии типа Т-клеточного рецептора (αβТ- или γδТ-клеточный рецептор) все Т-лимфоциты разделяют на 2 популяции – классические и неклассические [3]. Если роль классических Т-лимфоцитов, экспрессирующих αβТ-клеточный рецептор, хорошо изучена в патогенезе ВЗК, то функциональные особенности, как и фенотипический состав неклассических γδТ-клеток, остаются предметом активных исследований. На сегодняшний день в литературе имеются противоречивые данные о вовлечении γδТ-лимфоцитов в аутоиммунный ответ при ВЗК. С одной стороны, на экспериментальных моделях животных и у пациентов с БК и ЯК выявлены изменения в нормальной микробиоте и/или повышение уровня провоспалительных цитокинов, которые могут способствовать активации эффекторных функций γδТ-лимфоцитов и инициации каскада аутоиммунных реакций на уровне слизистой оболочки. Обладая специфическими характеристиками подвижности и повышенной экспрессией хемокинового рецептора CCR9, обеспечивающим миграцию в ЖКТ, активированные γδТ-клетки способны накапливаться в интестинальных лимфоидных структурах и поврежденной ткани слизистых оболочек пациентов с ВЗК, что коррелирует с тяжестью развития заболевания. С другой стороны, данная субпопуляция клеток вовлекается в регуляцию таких компонентов мукозальной иммунной системы, как продукция IgA, индукция пероральной толерантности, синтез фактора роста кератиноцитов, способствуя заживлению и репарации ткани ЖКТ [14; 15]. Таким образом, выявленные в нашем исследовании количественные изменения данной лимфоидной популяции согласуются с многими авторами, работы которых свидетельствуют о повышении

уровня $\gamma\delta$ T-лимфоцитов не только в циркуляции, но и в поврежденных участках тонкой и толстой кишки, их активации и накоплении в лимфоидной ткани пациентов с ВЗК [3; 16], что демонстрирует связь количества $\gamma\delta$ T-лимфоцитов с тяжестью аутоиммунного воспаления.

Субпопуляционный состав $\gamma\delta$ T-лимфоцитов у пациентов с ВЗК. $\gamma\delta$ T-лимфоциты являются гетерогенной популяцией, среди которой по экспрессии δ -цепи T-клеточного рецептора выделяют субпопуляции $V\delta 1^+$, $V\delta 2^+$, $V\delta 3^+$ T-клеток, отличающиеся локализацией в организме и функциональными свойствами [17]. На рис. 1 представлены оригинальные цитограммы результатов проточной цитометрии субпопуляционного состава $\gamma\delta$ T-лимфоцитов у пациентов с БК (рис. 1 а), ЯК (рис. 1 б) и донора (рис. 1 в), которые отражают общую тенденцию распределения $V\delta 1^+$, $V\delta 2^+$, $V\delta 3^+$ T-клеток в исследуемых группах (рис. 1 з).

У пациентов с БК выявлено увеличение содержания $V\delta 1^+$ T-клеток в 2,1 раза, а у пациентов с ЯК установлено повышение процента $V\delta 1^+$ и $V\delta 3^+$ T-клеток, соответственно, в 2,3 и 3,4 раза наряду со статистически значимым снижением количества $V\delta 2^+$ T-клеток во всех группах ВЗК относительно группы сравнения (рис.1). Известно, что в норме, доминирующей субпопуляцией (> 70 %) среди циркулирующих в периферической крови $\gamma\delta$ T-лимфоцитов являются $V\delta 2^+$ T-клетки, которые в основном распознают фосфоантигены микробных или трансформированных клеток и обладают выраженной цитотоксичностью. В то время как $V\delta 1^+$ и $V\delta 3^+$ T-клетки преимущественно локализуются в эпителии ЖКТ, коже, селезенке, печени и распознают липид-презентирующие МНС-подобные молекулы семейства CD1 или стресс-индуцированные молекулы, выполняя при этом преимущественно репаративную и регуляторную функции [11; 18].

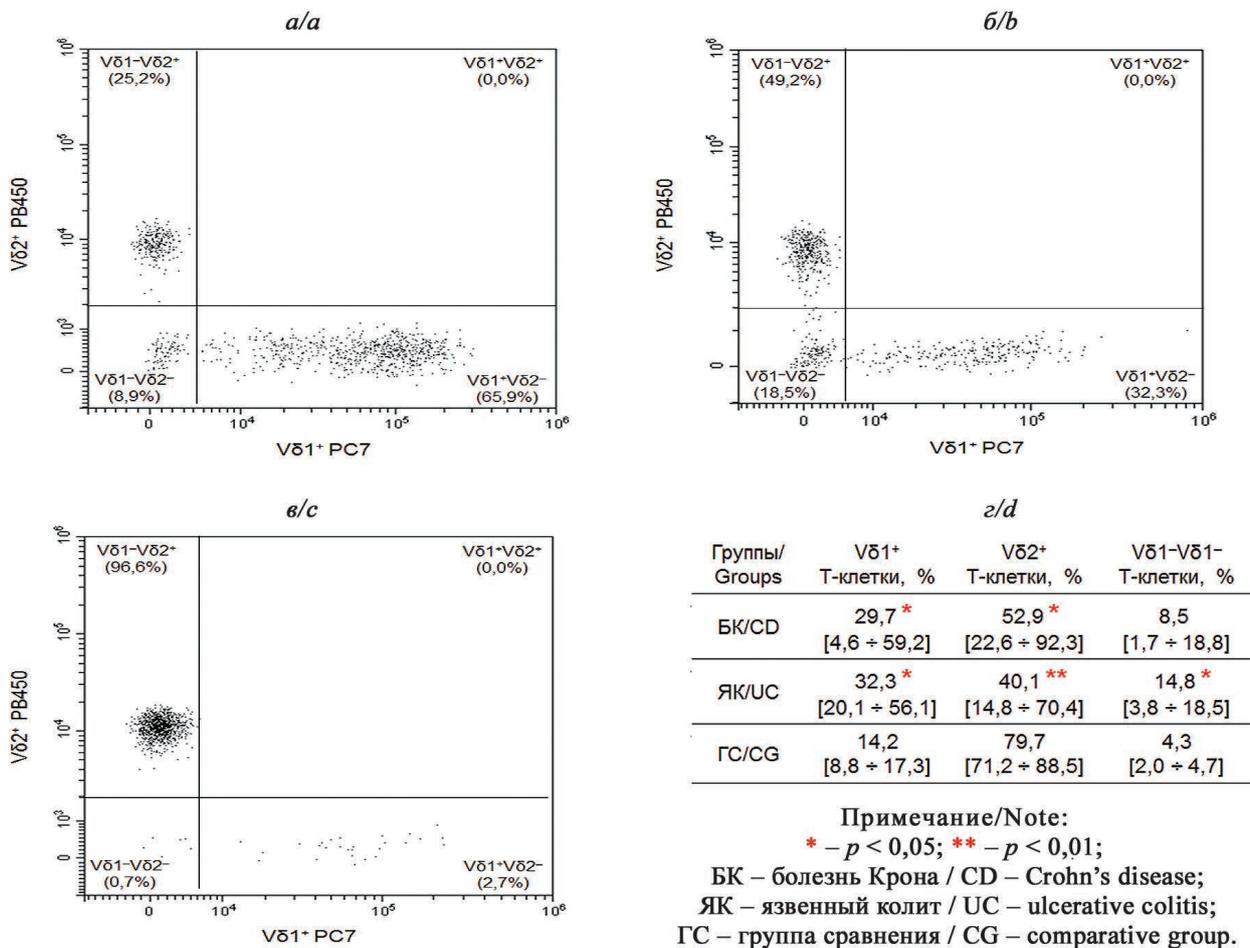


Рис. 1. Оригинальные цитограммы типичного распределения $V\delta 1^+$, $V\delta 2^+$, $V\delta 1-V\delta 2^-$ ($V\delta 3^+$) $\gamma\delta$ T-клеточных субпопуляций в исследуемых группах: а – пациент с болезнью Крона; б – пациент с язвенным колитом; в – здоровый донор; з – статистическая обработка количественного распределения субпопуляций $\gamma\delta$ T-лимфоцитов у пациентов с воспалительными заболеваниями кишечника относительно группы сравнения

Fig. 1. Original dot-plots of typical $V\delta 1^+$, $V\delta 2^+$, $V\delta 1-V\delta 2^-$ ($V\delta 3^+$) T-cells subsets distribution in investigated groups: а – patient with Crohn’s disease; б – patient with ulcerative colitis; в – healthy donor; д – statistical analysis of $\gamma\delta$ T-cells subsets numbers in patients with inflammatory bowel disease as compared with healthy donors

Выявленные у пациентов с ВЗК изменения субпопуляционного состава $\gamma\delta$ T-лимфоцитов свидетельствуют о перераспределении $V\delta 2^+$ T-клетки предположительно в пораженные участки ткани, что может способствовать прогрессированию аутоиммунного воспаления в слизистых оболочках. Это подтверждается установленной корреляционной взаимосвязью: с уменьшением количества циркулирующих $V\delta 2^+$ T-клеток в периферической крови пациентов с БК увеличивается активность заболевания по индексу Беста ($R = 0,79$; $p < 0,05$). Наряду с этим у пациентов с ЯК с повышением количества $V\delta 1^+$ T-клеток увеличивалась степень эндоскопической активности заболевания по шкале Schroeder ($R = 0,68$; $p < 0,05$). Согласно литературным данным тканевые $V\delta 2^+$ T-клетки экспрессируют больше ФНО α у пациентов с ранним началом заболевания, а также ФНО α и ИЛ-17 – у пациентов с поздним началом и длительным течением ВЗК [19]. Кроме того, рядом авторов отмечается пролиферация $V\delta 1^+$ и $V\delta 3^+$ T-клеток в ответ на нормальную микробиоту кишечника в результате срыва механизма толерантности в организме [20]. В нашем исследовании установлено, что количество $V\delta 1^+$ T-клеток у пациентов с ВЗК по-разному коррелировало с уровнем сывороточного IgA: при БК отмечалась прямая корреляция ($R = 0,49$; $p < 0,05$), в то время как при ЯК наблюдалась обратная зависимость ($R = -0,68$; $p < 0,05$), что отражает различные механизмы участия данной субпопуляции в регуляции гуморального иммунитета слизистых оболочек. Принимая во внимание, что $V\delta 1^+$ и $V\delta 3^+$ T-клетки являются основным источником γ ИФН, можно заключить, что их перераспределение способствует не только инициации, но и поддержанию хронической воспалительной реакции аутоиммунной природы [21].

Экспрессия функциональных маркеров на $\gamma\delta$ T-лимфоцитах у пациентов с ВЗК. Для исследования роли $\gamma\delta$ T-лимфоцитов в распознавании антигенов, инициации иммунного ответа и реализации эффекторных реакций на поздних стадиях развития аутоиммунного воспаления при ВЗК исследован функциональный фенотип клеток, включающий экспрессию паттерн-распознающего рецептора TLR4, антиген-презентирующей молекулы HLA-DR, рецептора естественной цитотоксичности CD314, адгезивной молекулы CD56 и ко-рецепторной молекулы CD8, характеризующие перфорин-гранзимовую цитотоксичность, а также CD45RO маркера клеток-памяти. На рис. 2 представлены результаты фенотипа $\gamma\delta$ T-лимфоцитов у пациентов с БК и ЯК по сравнению с контрольной группой.

У пациентов с ВЗК установлено увеличение экспрессии рецепторов врожденного иммунитета TLR4 и NKG2D на $\gamma\delta$ T-лимфоцитах относительно группы сравнения (рис. 2), что отражает их вовлечение в распознавание чужеродных структур и участие в первой линии иммунологической защиты [9; 10]. Многими авторами продемонстрирована повышенная экспрессия TLRs при ВЗК на большинстве интестинальных иммунных клетках, включая дендритные клетки и эпителиальные клетки [9], однако данные о $\gamma\delta$ T-лимфоцитах отсутствуют. Известно, что измененная экспрессия и постоянная стимуляция TLRs способствует продукции провоспалительных цитокинов, привлечению воспалительных клеток в ЖКТ и может являться одной из причин развития хронического воспаления в патогенезе аутоиммунных заболеваний ЖКТ [22]. В нашем исследовании уровень $\gamma\delta$ TCR⁺TLR4⁺T-клеток в периферической крови коррелировал с тяжестью заболевания по индексу Беста у пациентов с БК ($R = 0,60$; $p < 0,05$). В свою очередь, повышение конститутивно экспрессирующегося активационного рецептора NKG2D (CD314) на $\gamma\delta$ T-лимфоцитах пациентов с ВЗК (рис. 2), распознающего клеточный стресс или повреждение, способствует усилению таких эффекторных функций киллерных клеток, как цитотоксичность, продукция провоспалительных цитокинов и хемокинов, а также поддерживает их пролиферацию и выживаемость [23]. Согласно Pariente et al., у пациентов с БК (но не с ЯК) увеличивалось количество CD4⁺CD314⁺T-клеток, которые приобретали специфическую цитотоксическую активность и начинали синтезировать ИЛ-17, тем самым поддерживая хроническое воспаление с массовой нейтрофильной инфильтрацией [24]. Установленное повышение экспрессии киллерного рецептора на $\gamma\delta$ T-лимфоцитах у пациентов с БК также может способствовать избыточному синтезу ИЛ-17, что в свою очередь определяет пластичность классических T-лимфоцитов и их дифференцировку в патогенные T-хелперы 17-го типа. В то же время, выявленное увеличение процента CD314⁺ $\gamma\delta$ T-клеток у пациентов с ЯК коррелировало с уровнем сывороточного IgG ($R = 0,73$; $p < 0,05$), что предполагает иные механизмы функциональной активации T-лимфоцитов, в частности, стимуляцию T-хелперов 2-го типа, способствующие развитию гуморального иммунного ответа и синтезу антител.

Для подтверждения цитотоксического профиля $\gamma\delta$ T-клеток у пациентов с ВЗК изучена экспрессия ко-рецепторных молекул CD56 и CD8. Установлено, что у пациентов с БК преобладают $\gamma\delta$ TCR⁺CD56⁺T-клетки, в то время как у пациентов с ЯК повышено относительное количество $\gamma\delta$ TCR⁺CD8⁺T-лимфоцитов, что подтверждает различия молекулярных механизмов цитотоксичности (рис. 2). В ряде исследования обнаружено, что в слизистой оболочке пациентов с БК присутствует значительно большее количество клеток с поверхностными маркерами CD56 или CD16, которые могут играть непосредственную роль в анти-тело-зависимой клеточной цитотоксичности, преимущественно характерной для НК-клеток врожденного иммунитета [25]. Это может быть связано с особенностями воспалительного микроокружения ткани ЖКТ

и подтверждает существующую концепцию о поражении преимущественно всего ЖКТ при БК, в связи с чем уровень цитотоксичности в мононуклеарных клетках, полученных из слизистой оболочки пациентов с БК, значительно выше [26]. В то же время выявленный профиль $\gamma\delta$ T-лимфоцитов у пациентов с ЯК свидетельствует о преимущественно перфорин-гранзимовом эффекторном механизме цитотоксичности, который более характерен для классических цитотоксических Т-лимфоцитов и специфического иммунного ответа, наряду с которыми $\gamma\delta$ T-клетки могут также участвовать в повреждении ткани ЖКТ. При этом, чем меньше продолжительность заболевания, тем больше количество субпопуляций $V\delta 1^+$ и $V\delta 3^+$ T-клеток, экспрессирующих CD8, выявляется в периферической крови пациентов с ЯК ($R = -0,74$; $p < 0,05$).

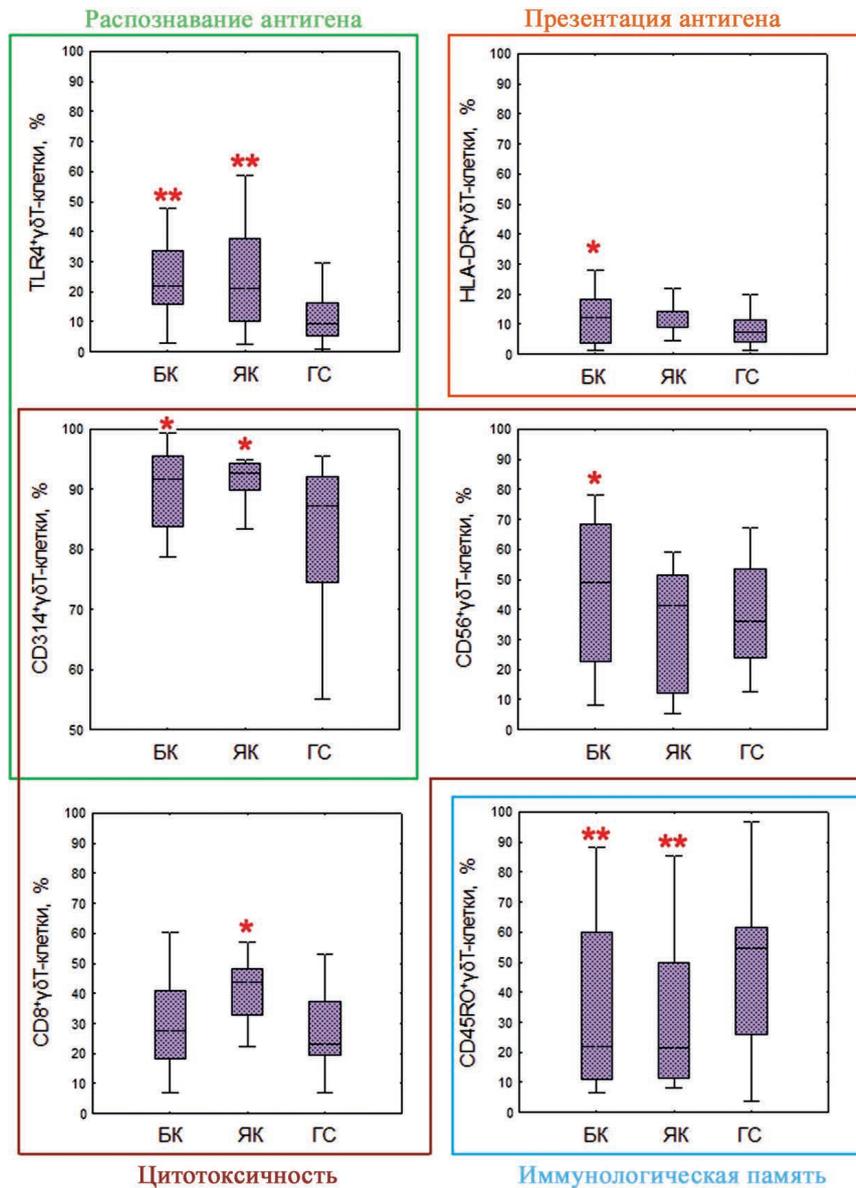


Рис. 2. Экспрессия функциональных маркеров (%) на $\gamma\delta$ T-лимфоцитах у пациентов с ВЗК и группы сравнения
 Примечание. * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; статистические значимые различия указаны относительно группы сравнения.

Fig. 2. Functional phenotype expression (%) on $\gamma\delta$ T-lymphocytes in patient with inflammatory bowel disease and healthy donors
 Note. * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; significant differences as compared with healthy donors.

Наряду с рецепторами распознавания и цитотоксичности $\gamma\delta$ T-клетки пациентов с БК характеризовались статистически значимой усиленной экспрессией молекулы HLA-DR относительно группы сравнения (рис. 2), принадлежащей к главному комплексу гистосовместимости II класса (МНС II класса), являющейся маркером поздней активации и активно участвующей в презентации антигенов, что указывает на возможность $\gamma\delta$ T-лимфоцитов выступать в качестве «профессиональных» антиген-презентирующих

клеток с последующей генерацией иммунологической памяти [3; 11]. Детальное исследование субпопуляционного состава $\gamma\delta$ T-лимфоцитов показало увеличение относительного количества $V\delta 2^+HLA-DR^+$ и $V\delta 3^+HLA-DR^+$ T-лимфоцитов (11,58 [4,41 ÷ 17,11] % и 14,01 [2,03 ÷ 15,5] % соответственно) по сравнению с контрольной группой (5,18 [3,45 ÷ 11,68] % и 7,09 [2,57 ÷ 13,03] % соответственно, $p < 0,05$), свидетельствующее о возможности презентации не только фосфоантигенов, но и стресс-индуцированных молекул, которые могут являться триггерами аутоиммунной реакции.

При исследовании компартмента иммунологической памяти выявлено статистически значимое снижение процентного содержания $CD45RO^+\gamma\delta$ T-лимфоцитов у пациентов исследуемых групп ВЗК (рис. 2), подтверждающее дальнейшую дифференцировку эффекторных клеток в терминально дифференцированные эффекторные клетки памяти, которые теряют экспрессию молекулы $CD45RO$ и начинают реэкспрессировать $CD45RA$. Полученные данные согласуются с исследованиями Gully et al., который показал, что большинство $\gamma\delta$ T-клеток при ВЗК имеют фенотипы эффекторных или терминально-дифференцированных клеток памяти и обладают наиболее выраженной супрессорной активностью по отношению к микроорганизмам, что может приводить к нарушению толерантности к собственным антигенам [27].

Заключение

Таким образом, $\gamma\delta$ T-лимфоциты играют активную многогранную иммунорегуляторную роль в координации реакций врожденного и приобретенного иммунитета для поддержания целостности слизистых оболочек и гомеостаза в ЖКТ. Однако усиление иммунологического надзора с их стороны при ВЗК может являться ключевыми звеньями в иммунопатогенезе БК и ЯК. В данном исследовании выявлено увеличение относительного количества $\gamma\delta$ T-лимфоцитов в периферической крови пациентов с ВЗК, субпопуляционный состав которых характеризовался преобладанием (более 50 %) ткане-резидентных клеток. В связи с этим, установленная повышенная способность $\gamma\delta$ T-лимфоцитов к распознаванию чужеродных структур может относиться как к фосфоантигенам микробной природы, так и стресс-индуцируемым молекулам. При этом $\gamma\delta$ T-лимфоциты пациентов с ВЗК активно вовлекаются не только в реакции врожденного иммунитета (распознавание антигенов), но и формируют пул клеток памяти, прошедших дифференцировку до терминально-дифференцированных эффекторных клеток (реакция приобретенного иммунитета). Функциональные особенности эффекторных реакций $\gamma\delta$ T-лимфоцитов у пациентов с БК характеризуются преимущественной антитело-зависимой клеточной цитотоксичностью и способностью презентацией антигенов, в то время как у пациентов с ЯК $\gamma\delta$ T-лимфоциты функционируют подобно классическим цитотоксическим Т-лимфоцитам. Выявленные корреляции с тяжестью заболеваний позволяют использовать фенотипические и функциональные изменения $\gamma\delta$ T-лимфоцитов в качестве диагностических и прогностических маркеров развития аутоиммунного воспаления в ВЗК, а сами $\gamma\delta$ T-лимфоциты рассматривать как терапевтическую мишень при разработке новых протоколов патогенетической терапии.

Библиографические ссылки / References

1. Ma R, Yuan D, Guo Y, Yan R, & Li K. Immune effects of $\gamma\delta$ T-Cells in colorectal cancer: A Review. *Frontiers in Immunology*. 2020;11:1600. DOI: 10.3389/fimmu.2020.01600.
2. Do JS, Kim S, Keslar K, Jang E, Huang E, Fairchild RL, Pizarro TT, Min B. $\gamma\delta$ T-Cells coexpressing gut homing $\alpha 4\beta 7$ and αE integrins define a novel subset promoting intestinal inflammation. *Journal of Immunology*. 2017;198(2):908–915. DOI: 10.4049/jimmunol.1601060.
3. McCarthy NE and Eberl M. Human $\gamma\delta$ T-Cell control of mucosal immunity and inflammation. *Frontiers in Immunology*. 2018;9:985. DOI: 10.3389/fimmu.2018.00985.
4. Ribot JC, Lopes N, & Silva-Santos B. $\gamma\delta$ T cells in tissue physiology and surveillance. *Nature Reviews Immunology*. 2021;21:221–232. DOI:10.1038/s41577-020-00452-4.
5. Fay NS, Larson EC and Jameson JM. Chronic Inflammation and $\gamma\delta$ T Cells. *Frontiers in Immunology*. 2016;7:210. DOI: 10.3389/fimmu.2016.00210.
6. Akitsu A, & Iwakura Y. Interleukin-17-producing $\gamma\delta$ T ($\gamma\delta 17$) cells in inflammatory diseases. *Journal of Immunology*. 2018;155(4):418–426. DOI: 10.1111/imm.12993.
7. Kühl AA, Pawlowski NN, Grollich K, Loddenkemper C, Zeitz M, Hoffmann JC. Aggravation of intestinal inflammation by depletion/deficiency of gammadelta T cells in different types of IBD animal models. *Journal of Leukocyte Biology*. 2007;81(1):168–75. DOI: 10.1189/jlb.1105696.
8. Cheroute H, Lambolez F, Mucida D. The light and dark sides of intestinal intraepithelial lymphocytes. *Nature Reviews Immunology*. 2011;11(7):445–456. DOI:10.1038/nri3007.
9. Lu Y, Li X, Liu S, Zhang Y, Zhang D. Toll-like Receptors and Inflammatory Bowel Disease. *Frontiers in Immunology*. 2018;30:9:72. DOI: 10.3389/fimmu.2018.00072.
10. La Scaleia R, Stoppacciaro A, Oliva S, Morrone S, Di Nardo G, Santoni A, Cucchiara S, Palmieri G. NKG2D/Ligand dysregulation and functional alteration of innate immunity cell populations in pediatric IBD. *Inflammatory Bowel Diseases*. 2012;18(10):1910–22. DOI: 10.1002/ibd.22899.
11. Vantourout P, Hayday A. Six-of-the-best: unique contributions of $\gamma\delta$ T cells to immunology. *Nature Reviews Immunology*. 2013;13(2):88–100. DOI: 10.1038/nri3384.

12. Silverberg MS, Satsangi J, Ahmad T, Arnott ID, Bernstein CN, Brant SR, et al. Toward an Integrated Clinical, Molecular and Serological Classification of Inflammatory Bowel Disease: Report of a Working Party of the 2005 Montreal World Congress of Gastroenterology. *Canadian Journal of Gastroenterology*. 2005;19(suppl4):5A–36A. DOI:10.1155/2005/269076.
13. Guan Q. A Comprehensive review and update on the pathogenesis of inflammatory bowel disease. *Journal of Immunology Research*. 2019; article ID7247238. DOI: 10.1155/2019/7247238.
14. Catalan-Serra I, Sandvik A, Bruland T. Gammadelta T-Cells in Crohn's Disease: a new player in the disease pathogenesis? *Journal of Crohn's and Colitis*. 2017;11(9):1135–1145. DOI: 10.1093/ecco-jcc/jjx039.
15. Presti E, Mitri M, Mocchiato F. Characterization of $\gamma\delta$ T-Cells in intestinal mucosa from patients with early-onset or long-standing inflammatory bowel disease and their correlation with clinical status. *Journal of Crohn's and Colitis*. 2019;13(7):873–883. DOI: 10.1093/ecco-jcc/jjz015.
16. Gryglewski A, Richter P, Szczepanik M. Changes in $\gamma\delta$ T-Cells in peripheral blood of patients with Ulcerative Colitis exacerbations. *Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis*. 2021;69(1):18. DOI: 10.1007/s00005-021-00620-x.
17. Wu D, Wu P, Qiu F, Wei Q, Huang J. Human $\gamma\delta$ T-cell subsets and their involvement in tumor immunity. *Cellular & Molecular Immunology*. 2017;14(3):245–253. DOI: 10.1038/cmi.2016.55.
18. Mann E, McCarthy E, Peake S. Skin- and gut-homing molecules on human circulating $\gamma\delta$ T-cells and their dysregulation in inflammatory bowel disease. *Clinical & Experimental Immunology*. 2012;170(2):122–30. DOI: 10.1111/j.1365-2249.2012.04649.x.
19. Kulkarni N, Pathak M, Lal G. Role of chemokine receptors and intestinal epithelial cells in the mucosal inflammation and tolerance. *Journal of Leukocyte Biology*. 2017;101(2):377–394. DOI: 10.1189/jlb.1RU0716-327R.
20. Jhita N, Raikar SS. Allogeneic gamma delta T cells as adoptive cellular therapy for hematologic malignancies. *Journal of Immunology*. 2022;2(3):334–350. DOI: 10.37349/ei.2022.00054.
21. Li M, Guo W, Dong Y, Wang X, Dai D, Liu X, et al.. Elevated Exhaustion Levels of NK and CD8⁺ T Cells as Indicators for Progression and Prognosis of COVID-19 Disease. *Frontiers in Immunology*. 2020;14(11):580237. DOI: 10.3389/fimmu.2020.580237.
22. Fernandes P, MacSharry J, Darby T, Fanning A, Shanahan F, Houston A, & Brint E. Differential expression of key regulators of Toll-like receptors in ulcerative colitis and Crohn's disease: a role for Tollip and peroxisome proliferator-activated receptor gamma? *Clinical & Experimental Immunology*. 2015;183(3):358–368. DOI:10.1111/cei.12732.
23. Stojanovic A, Correia MP and Cerwenka A. The NKG2D/ NKG2DL Axis in the Crosstalk Between Lymphoid and Myeloid Cells in Health and Disease. *Frontiers in Immunology*. 2018;9:827. DOI: 10.3389/fimmu.2018.00827.
24. Pariente B, Mocan I, Camus M, Dutertre CA, Ettersperger J, Cattan P, et al. Activation of the receptor NKG2D leads to production of Th17 cytokines in CD4⁺ T cells of patients with Crohn's disease. *Gastroenterology*. 2011;141(1):217–226.e1-2. DOI: 10.1053/j.gastro.2011.03.061.
25. Cohavy O, & Targan SR. CD56 Marks an Effector T Cell Subset in the Human Intestine. *Journal of Immunology*. 2007;178(9), 5524–5532. DOI:10.4049/jimmunol.178.9.5524.
26. Ng S, Plamondon S, Al-Hassi O. A novel population of human CD56⁺ human leucocyte antigen D-related (HLA-DR⁺) colonic lamina propria cells is associated with inflammation in ulcerative colitis. *Clinical & Experimental Immunology*. 2009;158(2):205–218. DOI: 10.1111/j.1365-2249.2009.04012.x.
27. Gully B, Rossjohn J, Davey M. Our evolving understanding of the role of the $\gamma\delta$ T cell receptor in $\gamma\delta$ T cell mediated immunity. *Biochemical Society*. 2021;49(5):1985–1995. DOI: 10.1042/BST20200890.

Статья поступила в редакцию 11.10.2022.
Received by editorial board 11.10.2022.

ПЕРВИЧНАЯ ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ ТИРЕОИДНОЙ СИСТЕМЫ И ЙОДНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОРГАНИЗМА ВЗРОСЛОГО НАСЕЛЕНИЯ ЗАВОДСКОГО РАЙОНА Г. МИНСКА

С. В. ПЕТРЕНКО¹⁾, И. В. ПУХТЕЕВА¹⁾, А. Н. СИДОРОВИЧ¹⁾

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

В настоящее время йододефицитные заболевания являются одними из наиболее распространенных заболеваний неинфекционного генеза. В Республике Беларусь принимаются профилактические меры для устранения данной проблемы. Разработана и внедряется государственная стратегия, основным направлением которой является обязательное использование йодированной соли в пищевой промышленности и общественном питании. Согласно результатам оценки йодной обеспеченности в мире, опубликованном международным советом по контролю йододефицитных заболеваний (ICCIDD) – глобальной некоммерческой, неправительственной организацией, созданной для устранения дефицита йода и последствий его негативного влияния на здоровье, в Республике Беларусь обеспечено адекватное потребление йода общей популяцией населения. Несмотря на принимаемые меры и достижения, проблема недостатка йода остается актуальной, особенно для групп с повышенным риском развития йододефицитных патологий – детей и беременных женщин. В исследовании проведен сравнительный анализ динамики первичной заболеваемости патологией щитовидной железы у населения Заводского р-на г. Минска за 2016–2020 гг. По результатам анализа было установлено, что динамика первичной заболеваемости узловым нетоксическим зобом и хроническим тиреоидитом имеет тенденцию к снижению. Наиболее высокие показатели первичной заболеваемости простым зобом, узловым нетоксическим зобом и аутоиммунным тиреоидитом были зарегистрированы в 2016 г. Согласно приведенным данным, выявлено наличие йодного дефицита с медианой экскреции йода с мочой, равной 196,15 мкг/л (при норме 240–400 мкг/л) у беременных женщин Заводского р-на г. Минска в 2021 г. Анализ проведенного анкетного обследования характера питания беременных женщин свидетельствует, что большинство респондентов не знают о пользе употребления йодированной соли для развития плода. Таким образом, причинами формирования дефицита йода в организме беременных можно считать недостаточное поступление йода в организм и отказ от приема йодных препаратов. В обследованном районе г. Минска 22 % женщин не соблюдают предписание врачей-эндокринологов о необходимости приема йодсодержащих препаратов.

Ключевые слова: медиана экскреции йода; беременные; йодированная соль; йододефицит; динамика первичной заболеваемости; профилактика йододефицита.

Образец цитирования:

Петренко СВ, Пухтеева ИВ, Сидорович АН. Первичная заболеваемость тиреоидной системы и йодное обеспечение организма взрослого населения Заводского района г. Минска. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;4:89–96.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-89-96>

For citation:

Petrenko SV, Puhteeva IV, Sidorovich AN. Primary incidence of the thyroid system and iodine supply of the adult population in the Zavodskoy district of Minsk. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;4:89–96. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-89-96>

Авторы:

Сергей Владимирович Петренко – кандидат медицинских наук, доцент; доцент кафедры экологической медицины и радиобиологии.

Ирина Викторовна Пухтеева – старший преподаватель кафедры экологической медицины и радиобиологии.

Анна Нильсовна Сидорович – студентка факультета экологической медицины.

Authors:

Sergei V. Petrenko, PhD (medicine), docent; associate professor at the department of environmental medicine and radiobiology.
petrenko51@yahoo.com

Irina V. Puhteeva, senior lecturer at the department of environmental medicine and radiobiology.
puhteeva@mail.ru

Anna N. Sidorovich, student at the faculty of environmental medicine.
anncherry279@mail.ru

PRIMARY INCIDENCE OF THE THYROID SYSTEM AND IODINE SUPPLY OF THE ADULT POPULATION IN THE ZAVODSKOY DISTRICT OF MINSK

S. V. PETRENKO^a, I. V. PUHTEEVA^a, A. N. SIDOROVICH^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: S. V. Petrenko (petrenko51@yahoo.com)

Currently, iodine deficiency diseases are one of the most common diseases of non-infectious origin. In the Republic of Belarus, preventive measures are being taken to eliminate the problem of iodine deficiency, in particular, a state strategy has been developed and implemented, the main measure of which is the mandatory use of only iodized salt in the food industry and public catering. Despite the measures taken, the problem of iodine deficiency remains relevant, especially for children and pregnant women. According to the results of the assessment of iodine sufficiency in the world, published by the RIAC on Surveillance for Iodine Deficiency Diseases (ICCIDD) – a global non-commercial, spherical need created for the use of iodine deficiency and the consequences of its negative examination on health, adequate iodine intake is provided in the Republic of Belarus. In 2016, the Global Iodine Network published maps characterizing iodine sufficiency for two main assessment categories – school-age children and pregnant women, confirming the status of the Republic of Belarus as a country with adequate iodine sufficiency. However, despite the results achieved, from the standpoint of medical monitoring, the quality of studies conducted to monitor the iodine supply of the population, the risks of excessive salt intake remain relevant. In this paper, a comparative analysis of the dynamics of the primary incidence of thyroid pathology in the population of the Zavodskoy district of the city of Minsk for the period 2016–2020 was carried out. According to the results of the analysis, a positive trend in the primary incidence of simple goiter, nodular non-toxic goiter and thyroiditis was revealed, while the dynamics of the primary incidence of hypothyroidism did not change. According to the data presented, the presence of iodine deficiency with a median urinary iodine excretion of 196.15 µg/l was revealed in pregnant women of the Zavodskoy district of Minsk in 2021. An analysis of the questionnaire survey of the nature of the nutrition of pregnant women showed that most of the surveyed do not know about the benefits of using iodized salt for the development of the fetus, and therefore the reason for the formation of iodine deficiency in the body of pregnant women is the insufficient intake of iodine in the body and refusal to take iodine preparations. In the surveyed region, 22 % of women do not comply with the prescription of endocrinologists about the need to take iodine-containing drugs.

Keywords: median iodine excretion; pregnant women; iodized salt; iodine deficiency; dynamics of primary morbidity; prevention of iodine deficiency.

Введение

Одной из важнейших задач в области профилактической экологической медицины является исследование причин и предотвращение болезней, вызванных влиянием природных факторов и окружающей среды [1]. Йододефицитные заболевания – это группа наиболее распространенных заболеваний неинфекционного генеза в мире [2]. Недостаток йода в среде обитания является одной из главных причин развития эндемических заболеваний щитовидной железы [3]. На сегодняшний день йододефицит является важной медико-социальной проблемой, связанной с условиями жизни населения. Он сопровождается не только нарушениями структуры и функции щитовидной железы, но и приводит к нарушениям фертильности, формированию врожденных аномалий развития, существенному снижению интеллектуального, образовательного и профессионального потенциала нации [4].

Йод – эссенциальный микроэлемент, который в организме человека не продуцируется самостоятельно [5]. Следовательно, его ежедневное поступление в организм с пищей, водой и воздухом является обязательным условием для нормального функционирования всех систем органов. Недостаток йода в почвах приводит к снижению его содержания в продуктах питания, производимых в данной местности, а потребляющие их люди страдают от его недостатка. Йододефицитные патологии представлены очень широко: от специфических заболеваний щитовидной железы до нарушения репродуктивной функции и развития патологий на этапе внутриутробного развития и в раннем детском возрасте. Изменения, вызванные недостаточным поступлением йода в организм на данных этапах жизни, проявляются необратимыми дефектами в интеллектуальном и физическом развитии детей [3].

Адекватная обеспеченность организма йодом особенно важна при планировании беременности и в ее ранние сроки, что обусловлено повышением потребности в этом микроэлементе для матери и ребенка. Дефицит йода и связанные с этим нарушения функции щитовидной железы у беременных женщин могут стать причиной развития гипотиреоза, гестоза, хронической внутриутробной гипоксии плода, привести к угрозе прерывания беременности, аномалиям развития плода, в том числе к нарушениям в формировании центральной нервной системы, основные структуры которой формируются до 10–12-й недели беременности. В первом

триместре беременности внутриутробное развитие и обеспечение плода тиреоидными гормонами осуществляется организмом матери. Поэтому полноценность обеспечения йодом развивающегося организма зависит от статуса йодной обеспеченности и отсутствия патологии щитовидной железы у матери [6; 7].

В работе [8] указывается, что проведенные исследования здоровья детского населения, проживающего в йододефицитных районах, выявили снижение уровня интеллектуальных способностей и точности мелкой моторики, по сравнению с детьми, проживающих в областях с нормальным уровнем потреблением йода. У населения, имеющего хронический дефицит йода, отмечается снижение коэффициента интеллекта в среднем на 13,5 пунктов. Установлено, что хронический дефицит йода у детей приводит к развитию патологий тиреоидной системы (простой зоб, субклинический гипотиреоз), нарушениям умственного и физического состояния, увеличению поглощения радиоактивного йода при ядерных инцидентах и, как следствие, риска развития радиационно-индуцированного рака щитовидной железы [8].

Следует отметить, что, согласно официальным статистическим данным, за последние 5 лет в Республике Беларусь первичная заболеваемость и общее количество пациентов с дисфункцией щитовидной железы значительно сократились, благодаря активной реализации государственной программы массовой йодной профилактики [9]. Однако все еще в структуре заболеваний щитовидной железы у детей достаточно часто наблюдается простой нетоксичный зоб.

Таким образом, несмотря на принимаемые меры проблема йододефицита в Республике Беларусь остается актуальной, особенно для групп с высоким риском развития заболеваний щитовидной железы (беременные женщины, детское население), что определяется практически повсеместным геофизическим дефицитом йода в почвах и водах, а также повышенным радиационным фоном и загрязнением окружающей среды. Мониторинг распространения первичной заболеваемости патологиями щитовидной железы у взрослого населения и определение йодного обеспечения организма является важной задачей экологической медицины на современном этапе.

Таким образом, необходимо дальнейшее детальное изучение динамики показателей заболеваемости щитовидной железы в Республике Беларусь. Патологии щитовидной железы требуют большого внимания не только со стороны медицины, но и экологии как науки, целью которой является снижение антропогенного негативного воздействия облучения на человека. Следовательно, актуальность данной работы определяется необходимостью минимизации ущерба для здоровья населения в условиях эндемичной геоэкологической ситуации йододефицита.

Целью исследования является оценка распространенности первичной заболеваемости патологией щитовидной железы у взрослого населения и определение уровня йодного обеспечения организма беременных женщин Заводского р-на г. Минска за 2016–2020 гг.

Материалы и методы исследования

Для изучения первичной заболеваемости тиреоидной системы у взрослого населения использовались официальные данные Национального статистического комитета Республики Беларусь, статистические сборники Республики Беларусь и медицинская документация учреждения здравоохранения «21-я Центральная районная поликлиника Заводского района г. Минска». Объектом исследования являются зарегистрированные случаи первичной заболеваемости тиреоидной системы у взрослого населения Республики Беларусь и Заводского р-на г. Минска за 2016–2020 гг. Анализ динамики первичной заболеваемости тиреоидной системы проводился стандартными статистическими методами расчета экстенсивных показателей. Степень йодообеспечения организма определялась по содержанию йода в утренней порции мочи беременных женщин с помощью церий-арсенитного спектрометрического метода с жидким озолением образцов хлорноватой кислотой, принятого в качестве стандартного Всемирной организацией здравоохранения.

Определение микроколичеств йода (в виде йодид-иона) основано на его действии в качестве катализатора на процесс восстановления ионов церия (IV) желтого цвета ионами мышьяка (III) в бесцветный трехвалентный ион церия (реакция Сандел – Кольхофф). Скорость уменьшения интенсивности окраски раствора церия (IV) зависит от содержания йода и измеряется фотометрически при длине волны 405 нм.

Средства измерений, вспомогательное оборудование и материалы, использованные при проведении измерений, приведены в табл. 1.

Анализ образцов проводился при температуре 18–23 °С. Образцы мочи хорошо перемешивались и в объеме 0,25 мл переносились в стеклянные термостойкие боросиликатные пробирки (100×13 мм, «Пирекс»). Образцы для построения калибровочной кривой (с конечным содержанием йода 0,20, 50, 100, 150 мкг/л) получали путем добавления следующих объемов стандартного раствора «В»: 0, 10, 25, 50, 75 микролитров (мкл) в дубликатах к пробиркам, содержащим соответственно 250, 240, 225, 200, 175 мкл воды для получения общего объема образца – 250 мкл. Затем в каждую пробирку добавляли по 750 мкл хлорноватой кислоты и немедленно перемешивали содержимое на вихревом смесителе «Вортекс-миксер» в течение 3–5 сек.

Средства измерений, вспомогательное оборудование и материалы,
использованные при определении степени йодообеспечения беременных женщин

Table 1

Measuring instruments, auxiliary equipment and materials,
used in determining the degree of iodine supply of pregnant women

Наименование технического средства, вспомогательного оборудования, материала исследования	Характеристики средств измерения, вспомогательного оборудования и материалов
Спектрофотометр с источником излучения в ультрафиолетовом диапазоне, оснащенный принтером	
Блок-термостат с микропроцессорным контролем температуры на 60 образцов	До 120 °С
Лабораторные весы	Диапазон измерений 0,01–200 г.
Автоматические пипетки со сменными наконечниками («Эппендорф», «Бранд»)	Объем 0,01–1,0 мл
Пробирки с крышками одноразовые, полипропиленовые	75 × 12 мм
Пробирки термостойкие боросиликатные «Пирекс»	100 × 13 мм
Деионизированная вода «MilliQ», («Миллипор»)	Сопротивление не ниже 18 МОм
Вихревой смеситель «Вортекс-миксер»	

Пробирки плотно закрывали алюминиевой фольгой и термостатировали в течение 40 мин при 105 °С. Этот процесс и называется жидким озолением. После инкубации пробирки охлаждали до комнатной температуры, доводили объем в каждой пробирке до 1,0 мл деионизированной водой, используя в качестве стандартной аналогичную пробирку, заполненную 1,0 мл воды с риской по уровню мениска. В каждую пробирку добавляли по 1,9 мл раствора арсенита натрия, перемешивали в течение 3–5 сек на миксере и выдерживали в течение 20 мин при комнатной температуре. Затем в каждую пробирку строго с интервалом в 20 сек добавляли по 450 мкл раствора церий-аммония сульфата, сразу перемешивали содержимое пробирки и точно через 20 мин измеряли оптическую плотность образца при 405 нм на спектрофотометре.

После определения уровней экскреции йода в индивидуальных порциях мочи проводился расчет интегрального показателя – медианной концентрации йода в моче, согласно которой далее определяется уровень йодной обеспеченности организма беременных женщин. Обработка данных проводилась при помощи программы *Microsoft Excel*.

Сравнение полученных результатов проводили согласно тому, что Всемирная организация здравоохранения определяет дефицит йода как среднюю концентрацию йода в моче <100 мкг/л вне беременности и <150 мкг/л во время беременности [10]. В связи с этим принято считать оптимальным показателем вне беременности среднюю концентрацию йода в моче в пределах 100–200 мкг/л, во время беременности – 220–250 мкг/л [11].

Специально разработанные бланки опроса позволили провести анкетирование среди беременных женщин с целью выяснения характера питания и источников поступления йода в организм, использования йодсодержащих добавок, потребления йодированной соли, продуктов питания с собственного подворья (мясо, сало, молочные продукты, картофель, овощи, фрукты).

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены показатели абсолютного числа случаев заболеваний эндокринной патологией, зарегистрированных в 2016–2020 гг. среди населения Заводского района г. Минска.

Следует отметить, что в 2016 г. был выявлен наиболее высокий уровень зарегистрированных случаев заболевания простым зобом, узловым нетоксическим зобом и аутоиммунным тиреоидитом. В 2019 г. отмечается наиболее высокий показатель по числу случаев заболевания гипотиреозом среди взрослого населения Заводского р-на г. Минска.

На рис. 2 представлены показатели первичной заболеваемости тиреоидной системы, зарегистрированные в 2016–2020 гг., среди населения Заводского р-на г. Минска.

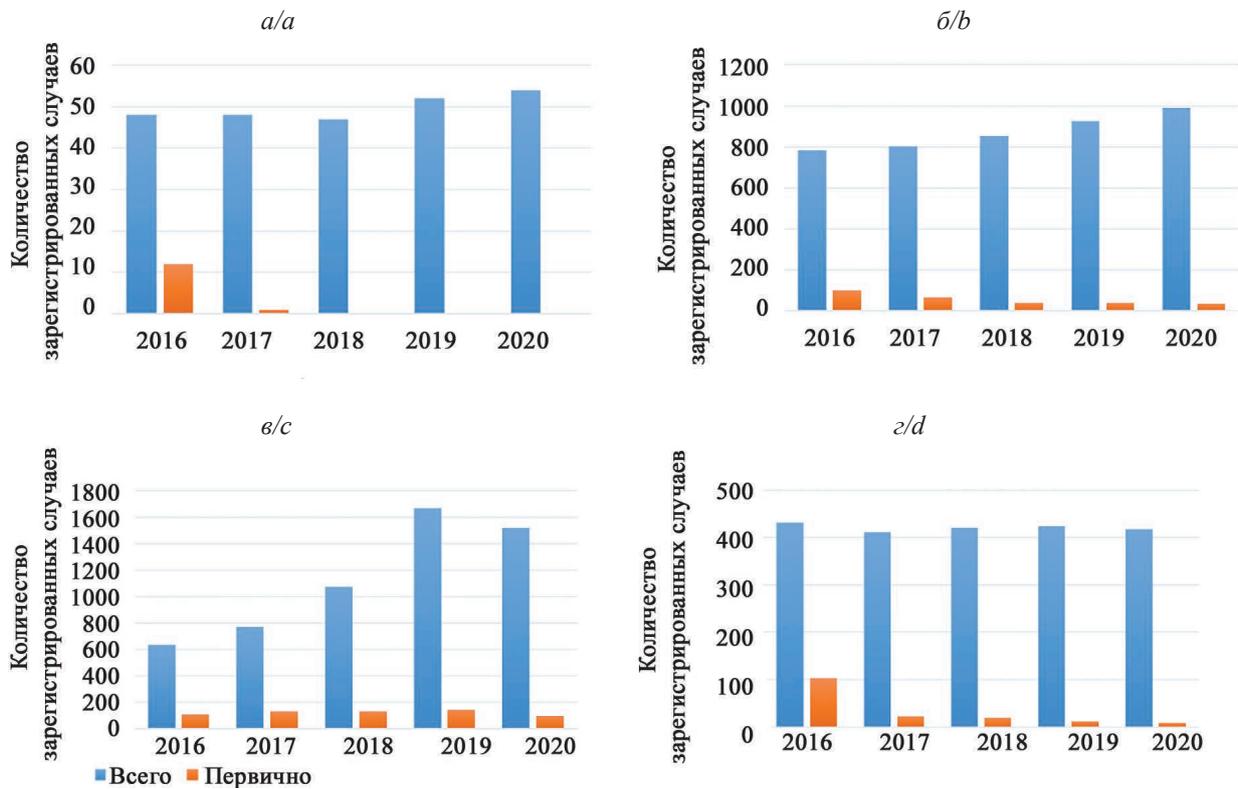


Рис. 1. Показатели абсолютного числа случаев заболеваний эндокринной патологией:
а – диффузный нетоксичный зоб; б – узловой нетоксичный зоб; в – гипотиреоз; г – хронический тиреодит

Fig. 1. Indicators of the absolute number of cases of endocrine pathology:
а – diffuse non-toxic goiter; б – nodular non-toxic goiter; в – hypothyroidism; г – chronic thyroiditis

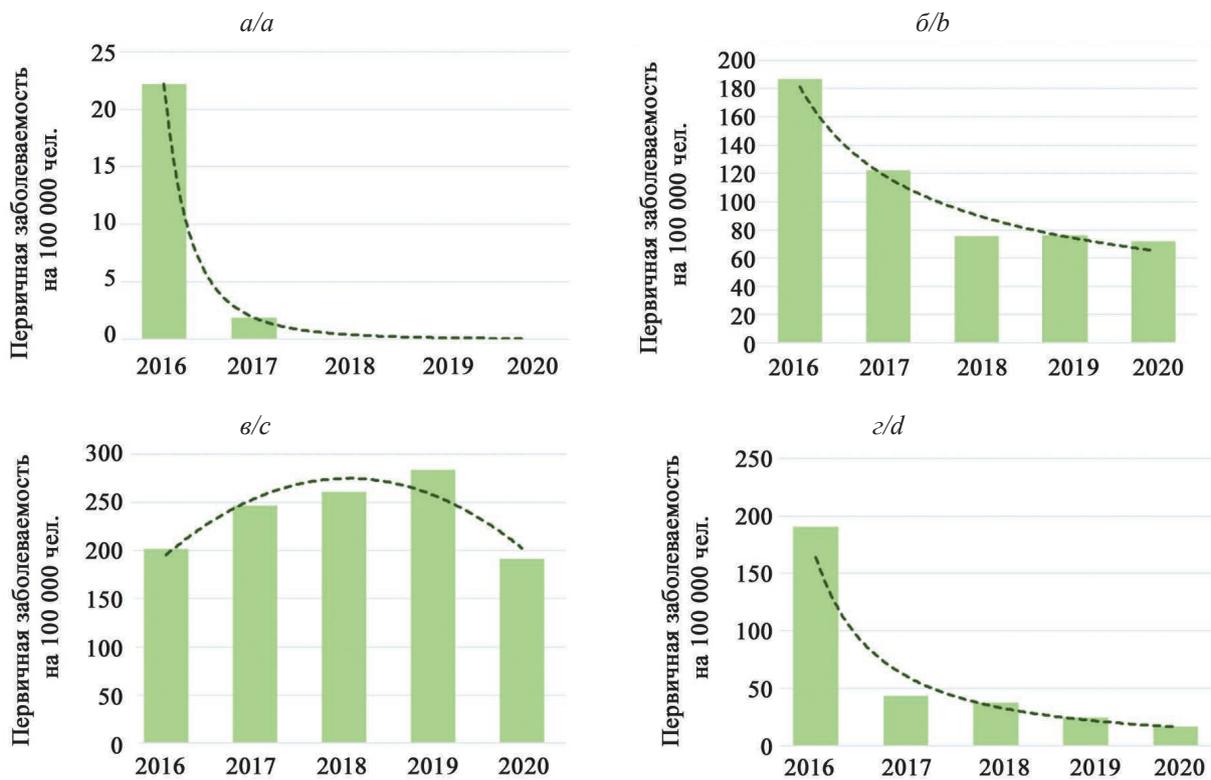


Рис. 2. Показатели первичной заболеваемости тиреоидной системы на 100 тыс. чел:
а – диффузный нетоксичный зоб; б – узловой нетоксичный зоб; в – гипотиреоз; г – хронический тиреодит

Fig. 2. Indicators of the primary incidence of the thyroid system per 100 thousand people:
а – diffuse non-toxic goiter; б – nodular non-toxic goiter; в – hypothyroidism; г – chronic thyroiditis

По результатам проведенного эпидемиологического анализа можно отметить следующее: динамика первичной заболеваемости узловым нетоксическим зобом и хроническим тиреоидитом практически не изменилась и имеет устойчивую тенденцию к снижению. При этом с 2018 г. не выявлено случаев заболеваемости населения диффузным нетоксичным зобом. В то же время динамика первичной заболеваемости гипотиреозом имеет фазный характер и достаточно высокие показатели выявляемости среди обследованного населения Заводского р-на г. Минска.

Таким образом, программа по ликвидации йододефицитных заболеваний в Беларуси, а также профилактические мероприятия, проводимые в течение последних десяти лет, включающие обязательное использование йодированной соли в общественном питании, привели к положительному результату – снижению динамики первичной заболеваемости тиреоидной системы населения.

В дальнейших исследованиях по оценке уровня йодной обеспеченности организма беременных женщин установлено, что содержание йода в организме у обследованных беременных женщин находится на нижней границе нормы. Среднее значение медианы концентрации йода в моче составляет 196,6 мкг/л, при норме 240–400 мкг/л (рис. 3).

Однако при детальном исследовании было установлено, что 14 % обследованных беременных женщин имеют йодный дефицит тяжелой и средней степени. Йодный дефицит легкой степени отмечен у 52 % беременных женщин. И только у 17 % обследованных беременных женщин было констатировано достаточное йодное обеспечение (медиана экскреции йода свыше 250 мкг/л).

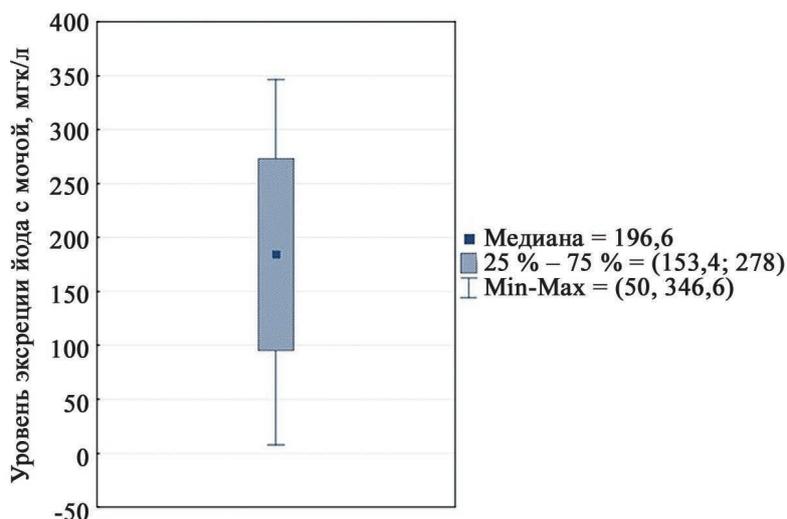


Рис. 3. Показатель уровня экскреции йода с мочой беременных женщин

Fig. 3. Indicator of the level of iodine excretion in the urine of pregnant women

В последние годы в структуре питания населения страны отмечены изменения, связанные с увеличением пищевых продуктов, обогащенных альтернативными йодными добавками. Продукты питания с собственного подворья таких добавок не содержат, что влияет на содержание йода в организме населения.

Для выяснения причин такого низкого показателя йодной обеспеченности организма беременных женщин путем анкетирования проведено обследование характера их питания и определены источники поступления йода в организм (табл. 2).

Таблица 2

Источники поступления йода

Table 2

Sources of iodine intake

Употребление йодированной соли в семье			Питание продуктами с собственного подворья		Йод. препараты	
регулярно	периодически	не обращают внимания	используют продукты с собственного подворья	все продукты покупают в магазине	принимают	не принимают
26 %	39 %	35 %	57 %	43 %	78 %	22 %

Результаты анализа информации, полученной по итогам анкетирования, свидетельствуют, что регулярно используют йодированную соль 26 % обследованных, 39 % женщин используют этот продукт только периодически, а 35 % анкетированных не обращают внимания и не придают значения этой информации. Йодсодержащие препараты по рекомендации врача принимает большинство беременных женщин – 78 % чел. И только одна из опрошенных знает о пользе достаточного йодного обеспечения организма матери для интеллектуального развития плода.

Причиной формирования дефицита йода в организме беременных может являться несоблюдение рекомендаций эндокринологов по приему йодсодержащих препаратов (йодомарин, йодбаланс). В обследованной когорте 22 % женщин не соблюдают предписание врачей-эндокринологов в отношении таких препаратов.

В анкете был поставлен вопрос о причинах употребления йодированной соли (табл. 3).

Таблица 3

Результаты опроса «Причина употребления йодированной соли»

Table 3

Results of the survey «Reason for drinking iodized salt»

Причина употребления йодированной соли			
для физического развития ребенка	для умственного развития ребенка	для профилактики заболеваний ЩЖ	все 3 пункта вместе
15 чел.	12 чел.	8 чел.	1 чел.
65 %	52 %	35 %	4 %

Таким образом, 35 % обследованных пациентов знают о том, что йодированная соль применяется для профилактики заболеваний щитовидной железы, однако они не используют и не употребляют йодированную соль. Важность достаточного йодного обеспечения для интеллектуального развития своего ребенка понимают 52 % опрошенных беременных. И только одна женщина из группы понимает, что все приведенные варианты обеспечивают максимальное поступление йода в организм ребенка.

Приведенные результаты могут свидетельствовать о том, что существует недостаток информирования населения, в том числе беременных женщин, по вопросам возможных последствий недостатка йода в организме. Следовательно, необходимо усилить проводимую разъяснительную работу в учреждениях здравоохранения о необходимости соблюдения предписаний врачей, приеме йодсодержащих препаратов для беременных женщин и последствиях йододефицита для матери и плода.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что за 2016–2020 гг. выявлено отсутствие тенденции роста первичной заболеваемости простым зобом, узловым нетоксическим зобом и тиреоидитом. Однако уровень первичной заболеваемости гипотиреозом остается еще достаточно высоким.

Медиана экскреции йода с мочой у беременных женщин, проживающих в Заводском р-не г. Минска, составила 196,6 мкг/л, при норме 240–400 мкг/л. Это свидетельствует о значительном количестве беременных женщин с недостатком йода в организме. Сложившаяся ситуация может быть связана с фактическим прекращением социальной рекламы преимущества йодированной соли и требует актуализации работы по информированию населения о последствиях дефицита йода в организме и источниках восполнения этого недостатка.

Таким образом, программа ликвидации йододефицита, разработанная и внедренная в Беларуси, показала высокую эффективность. Вместе с тем проблема йододефицита остается актуальной для групп с повышенным риском развития йододефицитных патологий – детей и беременных женщин. Это обусловлено недостаточным информированием населения о проблеме йододефицита, природным дефицитом йода в почвах и загрязнением окружающей среды.

Библиографические ссылки

1. Бурак ИИ, Григорьева СВ, Миклис НИ, Черкасова ОА. *Экологическая медицина. Часть 1*. Витебск: ВГМУ; 2018. 189 с.
2. Коломиец НД, Мохорт ТВ, Федоренко ЕВ, Мохорт ЕГ, Петренко СВ. Проблема дефицита йода и пути ее решения в Республике Беларусь. *Гигиена и санитария*. 2016;95(5):417–421.

3. Алфёрова ВИ, Мустафина СВ, Рымар ОД. Йодная обеспеченность в России и мире: что мы имеем на 2019 год? *Клиническая и экспериментальная тиреология*. 2019;15(2);73–82.
4. Платонова НМ. Йодный дефицит: современное состояние проблемы. *Клиническая и экспериментальная тиреология*. 2015;11(1);12–20.
5. Беспалов ВГ, Туманян ИА. Йод и женское здоровье. *Consilium Medicum*. 2019;21(6);78–85.
6. Мохорт ТВ. Йодный дефицит и беременность: проблема и решения. *Репродуктивное здоровье. Восточная Европа*. 2021;11(4);390–401.
7. Свиридонова МА. Дефицит йода, формирование и развитие организма. *Клиническая и экспериментальная тиреология*. 2014;10(1);9–20.
8. Смирнов АП, Машкина ЕА. Причины йододефицитных заболеваний и их влияние на когнитивные способности детского населения на примере Кировской области. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018;2(56);33–35.
9. Мохорт ТВ. Проблема йодной обеспеченности в республике Беларусь: результаты внедрения стратегии ликвидации йодного дефицита. *Международный эндокринологический журнал*. 2016;1(73);11–18.
10. Медведева МС, Лященко ЕН. Йодный дефицит как причина гипотиреоза у беременных: диагностика и меры профилактики. *Медицинский совет*. 2022;16(5);70–77.
11. Мохорт ТВ, Петренко СВ, Леушев БЮ, Федоренко ЕВ, Коломиец НД, Мохорт ЕГ. Оценка йодного обеспечения детей школьного возраста и беременных женщин в Республике Беларусь в 2017–2018 годах. *Клиническая и экспериментальная тиреология*. 2018;140(3);149–155.

References

1. Burak II, Grigoreva SV, Miklis NI, Cherkasova OA. *Ekologicheskaya meditsina. Chast 1* [Environmental medicine. Part 1]. Vitebsk: VGMU; 2018. 189 p. Russian.
2. Kolomic ND, Mohort TV, Fedorenko EV, Mohort EG., Petrenko SV. *Problema defitsita ioda i puti ee resheniya v Respublike Belarus* [The problem of iodine deficiency and ways to solve it in the Republic of Belarus]. *Hygiene and sanitation*. 2016;95(5);417–421. Russian.
3. Alfiorova VI, Mustafina SV, Rymar OD. *Iodnaya obespechennost' v Rossii i mire: chto my imeem na 2019 god?* [Iodine availability in Russia and the world: what do we have for 2019?]. *Clinical and experimental thyroidology*. 2019;15(2);73–82. Russian.
4. Platonova NM. *Iodnyi defitsit: sovremennoe sostoyanie problemy* [Iodine deficiency: the current state of the problem]. *Clinical and experimental thyroidology*. 2015;11(1);12–20. Russian.
5. Bepalov VG, Tumanyan IA. *Iod i zhenskoe zdorov'e* [Iodine and Women's Health]. *Consilium Medicum*. 2019;21(6);78–85. Russian.
6. Mohort TV. *Iodnyi defitsit i beremennost': problema i resheniya* [Iodine deficiency and pregnancy: a problem and solutions]. *Reproductive health. Eastern Europe*. 2021;11(4);390–401. Russian.
7. Sviridonova MA. *Defitsit ioda, formirovanie i razvitie organizma* [Iodine deficiency, formation and development of the body]. *Clinical and experimental thyroidology*. 2014;10(1);9–20. Russian.
8. Smirnov AP, Mashkina EA. *Prichiny iododefitsitnykh zabolevaniy i ikh vliyaniye na kognitivnyye sposobnosti detskogo naseleniya na primere Kirovskoi oblasti* [Causes of iodine deficiency diseases and their impact on the cognitive abilities of the child population on the example of the Kirov region]. *International Research Journal*. 2018;2(56);33–35. Russian.
9. Mohort TV. *Problema iodnoi obespechennosti v respublike Belarus': rezul'taty vnedreniya strategii likvidatsii iodnogo defitsita* [The problem of iodine availability in the Republic of Belarus: the results of the implementation of the strategy for eliminating iodine deficiency]. *International Endocrinology Journal*. 2016;1(73);11–18. Russian.
10. Medvedeva MS, Lyashenko EN. *Iodnyi defitsit kak prichina gipotireoza u beremennykh: diagnostika i mery profilaktiki* [Iodine deficiency as a cause of hypothyroidism in pregnant women: diagnosis and preventive measures]. *Medical Advice*. 2022;16(5);70–77. Russian.
11. Mohort TV, Petrenko SV, Leushev BYu, Fedorenko EV, Kolomiets ND, Mochort EG. *Otsenka iodnogo obespecheniya detei shkol'nogo vozrasta i beremennykh zhenshchin v Respublike Belarus* [Assessment of iodine provision for school-age children and pregnant women in the Republic of Belarus in 2017–2018]. *Clinical and experimental thyroidology*. 2018;140(3);149–155. Russian.

Статья поступила в редколлегию 21.08.2022.
Received by editorial board 21.08.2022.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 504.6:62/69

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И РЕКОНСТРУКЦИИ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ СТОЧНЫХ ВОД НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Ю. И. АХМАДИЕВА¹⁾, С. А. ДУБЕНОК²⁾

¹⁾Государственное производственное объединение «Белводоканал»,
ул. Некрасова, 5, 220040, г. Минск, Беларусь

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

Очистные сооружения сточных вод населенных пунктов в Республике Беларусь с учетом сложившейся в стране схемы канализования населенных пунктов осуществляют очистку сточных вод от населения, объектов социально-бытового назначения и объектов производственного назначения. При этом подавляющая часть очистных сооружений населенных пунктов построена в 1970–1990 гг. прошлого века и нуждаются в реконструкции как в части изменения мощности, так и применения более современных технологий и обработки осадка, образующего в процессе эксплуатации очистных сооружений. Единые стратегические подходы к выбору технологии очистки сточных вод и обработки осадка для предприятий, эксплуатирующих очистные сооружения населенных пунктов, в Республике Беларусь отсутствуют. Проведенный анализ национального законодательства в области использования и охраны водных ресурсов

Образец цитирования:

Ахмадиева ЮИ, Дубенок СА. Выбор технологических решений при строительстве и реконструкции очистных сооружений сточных вод населенных пунктов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;4:97–107.

<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-97-107>

For citation:

Akhmadziyeva YuI, Dubianok SA. Selection of technological solutions in the construction and reconstruction of wastewater treatment facilities in settlements. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;4:97–107. Russian.

<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-97-107>

Авторы:

Юлия Игоревна Ахмадиева – начальник отдела научно-технического обеспечения и технического аудита.

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

Authors:

Yulia I. Akhmadziyeva, head of the department of scientific and technical support and technical audit.

ahmadieva@belvodokanal.by

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

dsnega@list.ru

и управления водохозяйственными системами, а также функционирования очистных сооружений сточных вод позволил определить их технологические параметры работы в населенных пунктах, пригодные в качестве критериев комплексной оценки технологических решений при строительстве и реконструкции.

Ключевые слова: сточные воды; очистные сооружения; осадок сточных вод; загрязняющие вещества.

SELECTION OF TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE CONSTRUCTION, RECONSTRUCTION OF WASTEWATER TREATMENT FACILITIES IN SETTLEMENTS

Yu. I. AKHMADZIYEVA^a, S. A. DUBIANOK^a

^a*State Production Association «Belvodokanal»,
5 Niakrasava Street, Minsk 220040, Belarus*

^b*Belarusian National Technical University,
65 Niezaliežnasci Avenue, 220013 Minsk, Belarus*

Corresponding author: S. A. Dubianok (dsnega@list.ru)

Wastewater treatment plants of settlements in the Republic of Belarus, taking into account the existing scheme of sewerage of settlements in the country, carry out wastewater treatment from the population, social facilities and industrial facilities. At the same time, the vast majority of treatment facilities in settlements were built in the period 1970–1990 of the last century and need to be reconstructed both in terms of power changes and in terms of the use of more modern technologies for wastewater treatment and treatment of sludge that forms during the operation of treatment facilities. There are no unified strategic approaches to the choice of technology for wastewater treatment and sludge treatment for enterprises operating wastewater treatment plants in settlements in the Republic of Belarus. The analysis of the national legislation in the field of the use and protection of water resources and the management of water management systems, as well as the analysis of the functioning of wastewater treatment plants in settlements, made it possible to determine the technological parameters of the operation of wastewater treatment facilities in settlements, suitable as criteria for a comprehensive assessment of technological solutions during construction, reconstruction wastewater treatment plants of settlements.

Keywords: wastewater; treatment facilities; sewage sludge; polluting substances.

Введение

Основу правового регулирования Республики Беларусь в области использования и охраны водных ресурсов и управления водохозяйственными системами составляют Конституция Республики Беларусь, Кодексы и Законы Республики Беларусь, Указы Президента Республики Беларусь.

Основным нормативным документом, регулирующим отношения, возникающие при владении, пользовании и распоряжении водами и водными объектами, является Водный кодекс Республики Беларусь¹. Документом закреплён термин «сточные воды», а также установлены виды сточных вод, требования к сбросу сточных вод, порядок пользования водными объектами для сброса сточных вод.

В основу Кодексов и Законов принимаются постановления Совета Министров Республики Беларусь, регулирующие их отдельные положения (статьи). Так, порядок эксплуатации систем водоотведения (канализации), осуществляемой юридическими лицами всех форм собственности, оказывающими услуги водоснабжения и водоотведения (канализации), определяется постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 4 сентября 2019 г. № 594 «Об утверждении правил технической эксплуатации систем питьевого водоснабжения и водоотведения (канализации) населенных пунктов»².

Порядок приема (отведения) производственных сточных вод абонента в централизованную систему водоотведения (канализации), включая вопросы установления допустимых концентраций загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод, регулируется постановлением Совета

¹Водный кодекс Республики Беларусь: 30 июля 2014 г., № 149-З : Принят Палатой представителей 2 апреля 2014 г. : одобр. Советом Респ. 11 апреля 2014 г. : в ред. Закона Респ. Беларусь от 18.06.2019 г. // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь. Минск: Национальный центр правовой информации Республики Беларусь, 2019.

²Об утверждении Правил технической эксплуатации систем питьевого водоснабжения и водоотведения (канализации) населенных пунктов: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 4 сентября 2019 г., № 594 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=C21900594> (дата обращения: 25.09.2022).

Министров Республики Беларусь от 30 сентября 2016 г. № 788 «Об утверждении правил пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах»³.

В развитие Законов Республики Беларусь, Указов Президента Республики Беларусь и постановлений Совета Министров Республики Беларусь основные требования к проектированию, строительству и эксплуатации систем водоотведения (канализации) и сооружений на них регламентируются, в основном, нормативными правовыми актами (далее – НПА) и техническими нормативными правовыми актами (далее – ТНПА) следующих органов государственного управления:

- Министерство архитектуры и строительства;
- Министерство жилищно-коммунального хозяйства;
- Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды.

Перечень нормируемых загрязняющих веществ в составе сточных вод, а также порядок установление нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод закреплены постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 26 мая 2017 г. № 16 «О нормативах допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод»⁴. Документ устанавливает максимально допустимые значения показателей и концентрации загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых, городских сточных вод, удаляемых в процессе биологической очистки, а также максимально допустимые значения показателей и концентраций загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод при их сбросе в поверхностные водные объекты в зависимости от видов экономической деятельности. Следует отметить, что указанным НПА⁵ установлен перечень нормируемых загрязняющих веществ в составе сточных вод и утверждена инструкция о порядке установления нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод. При этом НПА не содержит информации о технологиях, технологических схемах и оборудовании, применяя которые возможно достичь установленных нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод.

Кроме того, в процессе очистки сточных вод на очистных сооружениях сточных вод населенных пунктов образуется ряд отходов (песок, улавливаемый в песколовках; твердые отходы, задерживаемые на решетках (отбросы); сырой осадок, отделяемый в первичных отстойниках; избыточный активный ил, образующийся в процессе очистки сточных вод в аэротенках), среди которых в количественном отношении преобладают осадки – сырой осадок и избыточный активный ил [1].

В настоящее время возможности размещения осадков сточных вод на объектах хранения в Республике Беларусь практически исчерпаны, при этом осадки сточных вод как отдельный (специфический) объект нормативного правового регулирования в области обращения с отходами в Республике Беларусь не выделяются. Деятельность по обращению с этими отходами вне зависимости от источников образования регламентируется НПА и ТНПА, устанавливающими требования и порядок обращения с отходами [1].

Проведенный анализ национального законодательства Республики Беларусь свидетельствует об отсутствии НПА и ТНПА, позволяющих обоснованно подходить к выбору наиболее эффективных для обеспечения нормативов качества окружающей среды технологий и технологических решений по очистке сточных вод и обработке осадков при строительстве (реконструкции) очистных сооружений сточных вод населенных пунктов с учетом экономической целесообразности и технической возможности их применения.

При этом необходимость внедрения наилучших доступных технических методов (далее – НДТМ) в Республике Беларусь закреплена рядом НПА, а формирование и совершенствование национальной системы НДТМ и ее повсеместное внедрение предусмотрено в качестве одного из мероприятий Национального плана действий по развитию «зеленой» экономики в Республике Беларусь на 2021–2025 гг.⁶

³Об утверждении Правил пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 30 сентября 2016 г., № 788 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600788&p1=1> (дата обращения: 25.09.2022).

⁴О нормативах допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 26 мая 2017, № 16 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732141&p1=1> (дата обращения: 25.09.2022).

⁵Там же.

⁶Национальный план действий по развитию «зеленой» экономики в Республике Беларусь на 2021 – 2025 годы [Электронный ресурс]. URL: https://economy.gov.by/ru/nac_plan-ru/ (дата обращения: 25.09.2022).

Материалы и методы исследования

Очистные сооружения населенных пунктов являются объектами, которые, оказывая услуги по сбору, транспортировке и очистке сточных вод, в настоящее время сбрасывают наибольшие объемы сточных вод и наибольшую массу загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты Республики Беларусь.

В табл. 1 приведены объемы сточных, в том числе недостаточно очищенных сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты предприятиями различных видов экономической деятельности, основанные на данных информационной системы Государственного Водного Кадастра Республики Беларусь за 2021 г.⁷

Таблица 1

Объем сброса сточных вод в поверхностные водные объекты за 2021 год

Table 1

The volume of wastewater discharge into surface water bodies for 2021

Секция	Наименование вида экономической деятельности	Объем сброса сточных вод в поверхностные водные объекты, тыс. м ³	Из них недостаточно очищенных сточных вод, тыс. м ³
A	Продукция сельского хозяйства, лесного хозяйства, рыболовства и рыбоводства	217361,942	10,164
B	Продукция добычи полезных ископаемых	3936,95	0,0
C	Продукция обрабатывающей промышленности	100476,071	109,733
D	Электроэнергия, газ, пар, горячая вода и кондиционированный воздух	127326,263	141,003
E	Услуги по снабжению водой, очистке сточных вод, утилизации и обезвреживанию отходов	545766,321	2025,665
F	Здания и сооружения; работы общестроительные по возведению зданий и сооружений	44226,674	4,226
G	Услуги по оптовой и розничной торговле; услуги по ремонту автомобилей и мотоциклов	732,149	5,389
H	Услуги транспорта и услуги по хранению грузов	17546,26	4,14
I	Услуги по временному проживанию и общественному питанию	11446,592	0,0
J	Услуги в области информации и связи	4,7	0,0
K	Услуги финансовые и страховые	2,3	0,0
L	Услуги, связанные с недвижимым имуществом	212,766	0,597
M	Услуги профессиональные, научные и технические	1015,593	31,51
N	Услуги административные и вспомогательные	60949,062	3,168
O	Услуги в области государственного управления и обороны, предоставляемые обществу в целом; услуги по обязательному социальному страхованию	220,2	0,0
P	Услуги в области образования	17,059	0,0
Q	Услуги в области здравоохранения и социального обслуживания населения	239,787	6,838
R	Услуги в области искусства, развлечений и отдыха	2458,582	0,0
S	Услуги прочие	0,0	0,0
Итого		1133939,271	2342,433

⁷Официальный сайт РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cricuwr.by/> (дата обращения: 25.09.2022).

Таким образом, суммарный объем сброса сточных вод в поверхностные водные объекты Республики Беларусь за 2021 г. составил 1,13 млн м³, из которых 545,8 млн м³ или 48,1 % приходится на предприятия, относящиеся к секции Е «Услуги по снабжению водой, очистке сточных вод, утилизации и обезвреживанию отходов» (далее – секция Е). При этом максимальный объем сброса недостаточно очищенных сточных вод (2 млн м³) также приходится на предприятия секции Е и составляет 86,5 % от общего объема сброса недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты.

В Республике Беларусь к организациям, основным видом экономической деятельности которых является оказание услуг по сбору и обработке сточных вод, относятся специализированные организации водопроводно-канализационного хозяйства (водоканалы) и многоотраслевые организации жилищно-коммунального хозяйства, оказывающие услуги водоснабжения и водоотведения (канализации).

В настоящее время общее количество организаций системы Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь, оказывающих услуги водоснабжения и водоотведения (канализации) составляет 71 единицы, из которых 22 – относятся к специализированным организациям водопроводно-канализационного хозяйства и 49 – к многоотраслевым организациям жилищно-коммунального хозяйства.

В хозяйственном ведении организаций ВКХ находятся очистные сооружения сточных вод населенных пунктов различных видов и конфигурации, включающие в себя стадии механической, биологической, физико-химической очистки и их комбинации.

Очистные сооружения сточных вод населенных пунктов предназначены для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих от потребителей (населения) и абонентов (предприятий и организаций), и производственных сточных вод, поступающих от абонентов, в централизованные системы водоотведения (канализации). При этом на очистные сооружения могут поступать поверхностные сточные воды, а также собственные сточные воды организаций ВКХ (ЖКХ) [2].

Сооружения биологической очистки являются основным элементом процесса обработки различных видов сточных вод и включает две подгруппы:

- сооружения для очистки в естественных условиях;
- сооружения для очистки в искусственно созданных условиях [3].

Первая группа сооружений включает поля фильтрации, поля подземной фильтрации, фильтрующие колодцы и траншеи, песчано-гравийные фильтры, вентилируемые площадки подземной фильтрации, грунтово-растительные площадки, а также биологические пруды.

Сооружения очистки сточных вод в искусственно созданных условиях включают следующие виды:

- биологические фильтры, предусматривающие очистку преимущественно прикрепленными формами микроорганизмов, в том числе создающими биопленку на поверхности носителя;
- сооружения очистки сточных вод активным илом, предусматривающие использование свободноплавающих форм микроорганизмов;
- комбинированные сооружения [3].

В статье рассмотрены очистные сооружения биологической очистки в искусственно созданных условиях со сбросом очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты (далее – ОССВНП).

В рамках выполняемого исследования ОССВНП Республики Беларусь условно разделены на категории в зависимости от производственной мощности (производительности), то есть проектного объема сброса сточных вод:

- сверхкрупные (более 600 000 м³/сут.);
- крупнейшие (от 200 000 м³/сут. до 600 000 м³/сут.);
- крупные (от 40 000 м³/сут. до 200 000 м³/сут.);
- большие (от 10 000 м³/сут. до 40 000 м³/сут.);
- средние (от 4 000 м³/сут. до 10 000 м³/сут.);
- небольшие (от 1 000 м³/сут. до 4 000 м³/сут.);
- малые (от 100 м³/сут. до 1 000 м³/сут.);
- сверхмалые (от 10 м³/сут. до 100 м³/сут.).

Процентное распределение ОССВНП в зависимости от производственной мощности в соответствии с принятой классификацией представлено на рис. 1.

В стране преобладают малые (26,4 %) и небольшие (24,5 %) ОССВНП, на долю сверхмалых ОССВНП приходится 15,7 %, средние и большие ОССВНП составляют 15,1 и 10,1 % соответственно. Наименьшую долю составляют крупнейшие (1,3 %) и сверхкрупные (0,6 %) ОССВНП.

Одной из актуальных проблем эксплуатации ОССВНП в стране является несоответствие фактического расхода поступающих на очистку сточных вод проектным значениям.

На рис. 2 представлен фактический уровень использования производственной мощности ОССВНП в 2021 г., рассчитанный как отношение фактического расхода поступивших на очистку сточных вод к проектной мощности очистных сооружений, в соответствии с принятой классификацией.

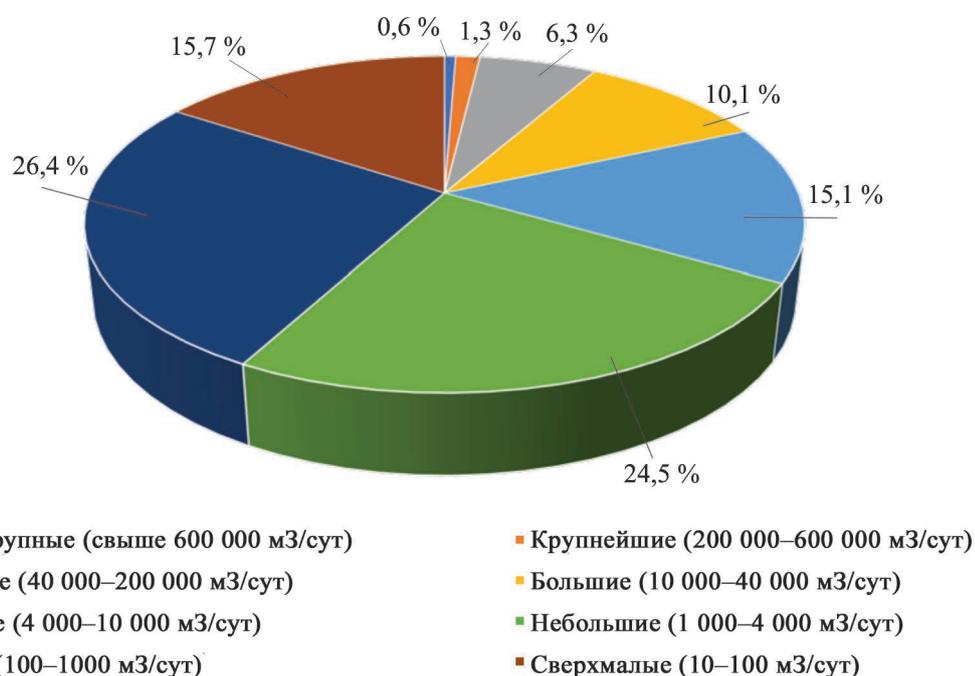


Рис. 1. Мощность очистных сооружений сточных вод населенных пунктов

Fig. 1. Capacity of wastewater treatment plants in settlements

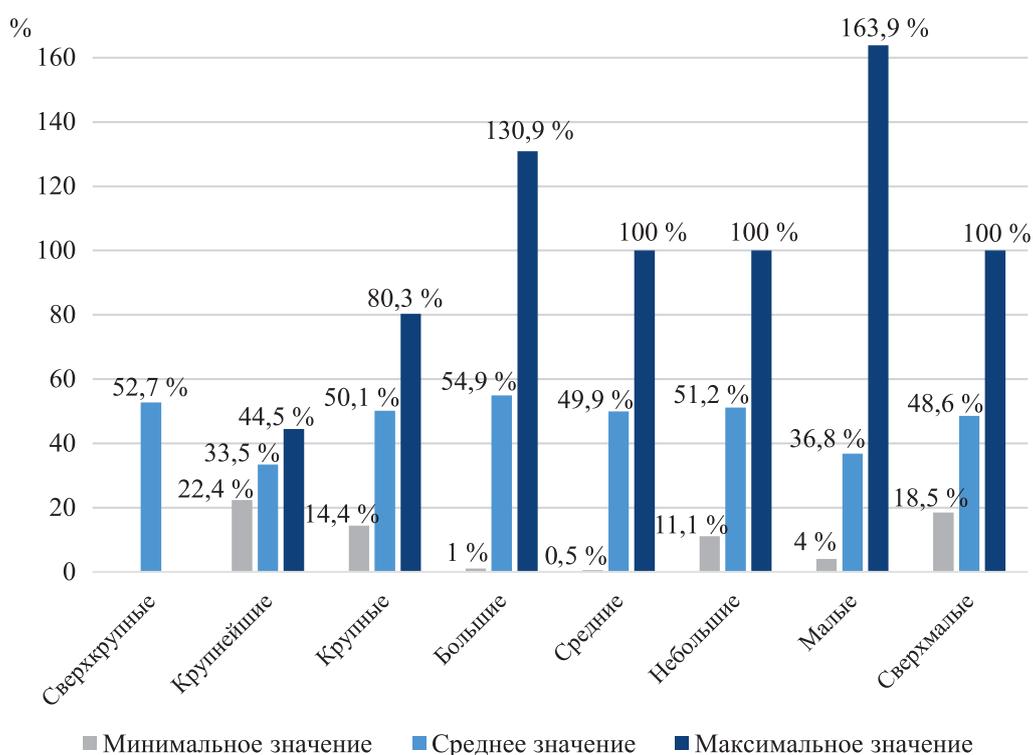


Рис. 2. Уровень использования производственной мощности очистных сооружений сточных вод населенных пунктов

Fig. 2. The level of use of the production capacity of wastewater treatment plants in settlements

Показатели уровня использования производственной мощности изменяются от минимального значения 0,5 % (средние ОССВНП) до максимального 163,9 % (малые ОССВНП). Ввиду того, что сверхкрупные ОССВНП представлены в республике в единственном числе, для данной категории приведено фактическое значение уровня использования производственной мощности. При этом средние значения уровней использования производственной мощности ОССВНП для всех принятых категорий не превышают 55 %.

Полученные данные свидетельствуют о том, что по уровню использования производственной мощности условия эксплуатации подавляющего большинства ОССВНП значительно отличаются от проектных, что ставит под угрозу достижение предусмотренной проектом эффективности очистки сточных вод и достижения установленных нормативов качества очищенных сточных вод, а также требует высокой профессиональной подготовки обслуживающего персонала организации ВКХ, эксплуатирующей ОССВНП.

Несоответствие фактического расхода, а также качественного и количественного состава сточных вод, поступающих на ОССВНП, проектным значениям приводит к дисбалансу соотношения между производительностью по расходу и количеством органических веществ в составе сточных вод и вызывает снижение эффективности работы ОССВНП (биомасса работает либо в режиме перегрузки, либо в режиме голодания).

Усугубляет сложившуюся ситуацию высокий уровень физического износа ОССВНП. Подавляющее большинство ОССВНП введены в эксплуатацию в период с 1967 по 1984 г. и подвергались лишь частичному ремонту отдельных сооружений и устройств: замене аэрационных систем и воздуходувок, ремонту решеток, переоборудованию и строительству дополнительных первичных и вторичных отстойников и т. д. В основном, такие работы выполнялись в период с 1990 по 2008 г. При этом нормативный срок службы систем аэрации аэротенков очистных сооружений канализации составляет 10 лет⁸.

В настоящее время в республике отсутствуют НПА и ТНПА, определяющие порядок расчета и оценки износа ОССВНП. Как правило, уровень износа рассчитывается организациями ВКХ по отдельным стадиям технологического процесса очистки сточных вод, либо по отдельным узлам, единицам оборудования в соответствии с данными бухгалтерской отчетности. Такие подходы не отражают реального технического состояния сооружений и устройств, а также ОССВНП в целом.

Характерной особенностью эксплуатации ОССВНП является значительный объем сточных вод, поступающих в централизованные системы водоотведения (канализации) и далее на ОССВНП от промышленных предприятий (рис. 3).

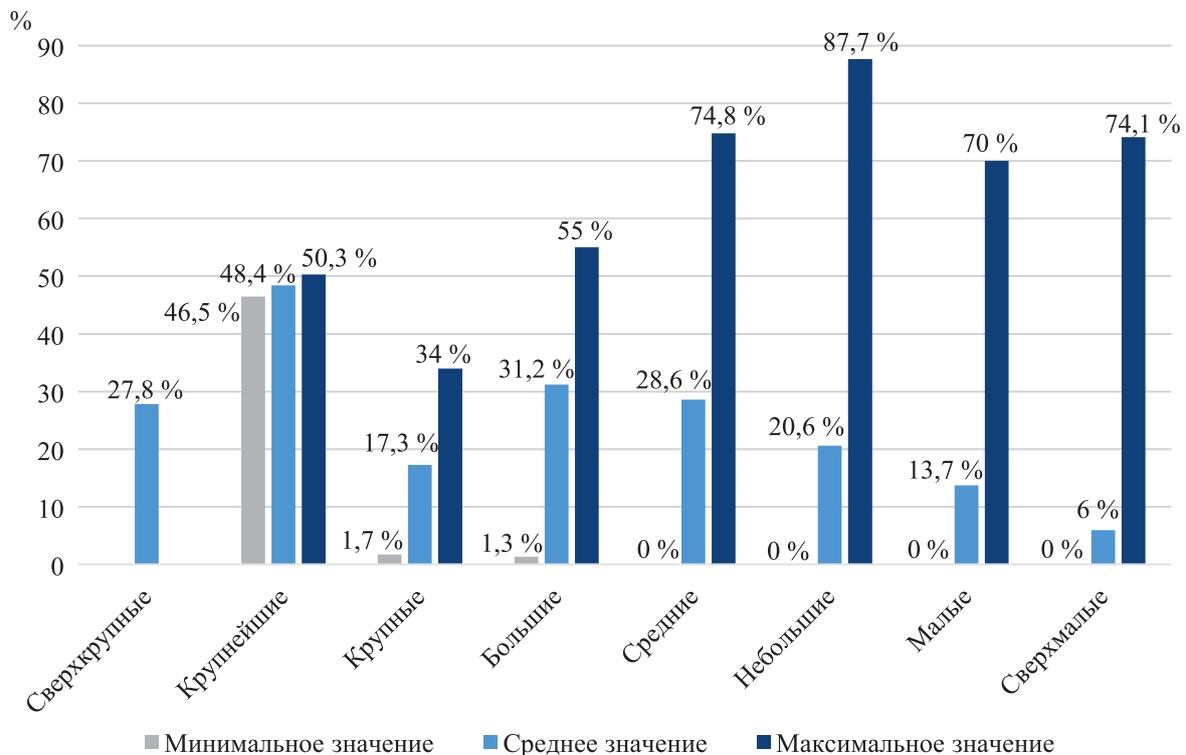


Рис. 3. Доля производственных сточных вод в общем объеме сточных вод, поступающих на очистные сооружения сточных вод населенных пунктов

Fig. 3. The share of industrial wastewater in the total volume of wastewater entering the wastewater treatment facilities of settlements

⁸Об установлении нормативных сроков службы основных средств и признании утратившими силу некоторых постановлений Министерства экономики Республики Беларусь: постановление Министерства экономики Республики Беларусь, 30 сентября 2011 г., № 161 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p=0=W21124359> (дата обращения: 25.09.2022).

Доля производственных сточных вод в общем объеме сточных вод, поступающих на ОССВНП, в среднем по республике составляет 24,2 %, при этом данный показатель существенно изменяется в разных населенных пунктах: для сверхкрупных ОССВНП среднее значение составляет 27,8 %, для крупнейших – 48,4, для крупных – 17,3, для больших – 31,2, для средних – 28,6, для небольших – 20,6, для малых – 13,7, для сверхмалых – 6,0 %.

При этом для отдельных объектов доля производственных сточных вод в общем объеме сточных вод, поступающих на ОССВНП, значительно превышает средние значения и достигает и достигает более 80 % в отдельных населенных пунктах, то есть ОССВНП в таких случаях фактически работают на очистку производственных сточных вод промышленных предприятий, что приводит к нарушению условий их эксплуатации за счет неравномерного поступления высококонцентрированных сточных вод, содержащих специфические загрязняющие вещества.

В соответствии с действующим законодательством, сброс производственных сточных вод в окружающую среду, в том числе через систему канализации населенных пунктов, должен осуществляться с соблюдением условий приема таких сточных вод в систему канализации, устанавливаемых местными исполнительными и распорядительными органами в порядке, установленном Советом Министров Республики Беларусь. При невозможности обеспечить допустимую концентрацию загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты, концентрацию этих веществ подлежит снижать за счет устройства локальных очистных сооружений⁹.

Однако в настоящее время в республике большинство промышленных предприятий осуществляют отведение производственных сточных вод в централизованные системы водоотведения без предварительной очистки, что нарушает работу очистных сооружений сточных вод населенных пунктов, снижает эффективность очистки сточных вод и приводит к сбросу недостаточно очищенных сточных вод в водные объекты [4].

Основной объем (83,7 %) производственных сточных вод, принятых организациями ВКХ от абонентов в 2021 г., соответствует нормативам водоотведения, установленным местными исполнительными и распорядительными органами в соответствии с Правилами¹⁰, однако имеют место случаи нарушения условий приема сточных вод в централизованные системы водоотведения (канализации).

Суммарный объем сточных вод, принятых организациями ВКХ от абонентов в 2021 г., составил более 164,0 млн м³, из них 26,8 млн м³ (16,3 %) – это производственные сточные воды с превышением допустимых концентраций загрязняющих веществ в их составе. При этом в 25 % случаев превышений организациями ВКХ были зафиксированы залповые сбросы производственных сточных вод в централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов.

Абонентами, регулярно нарушающими условия приема сточных вод в централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов страны, являются преимущественно предприятия по производству продуктов питания и напитков; химических продуктов, текстильных изделий и кожевенной промышленности, а также предприятия, оказывающие услуги по мойке, техническому обслуживанию и ремонту автомобилей.

Наибольшее влияние производственных сточных вод на снижение эффективности работы ОССВНП характерно для крупных (с проектной мощностью от 40 000 м³/сут. до 200 000 м³/сут.) и больших (с проектной мощностью от 10 000 м³/сут. до 40 000 м³/сут.) ОССВНП, расположенных в городах с численность населения свыше 50 тыс. человек. Это, как правило, города областного и районного подчинения с развитой производственной и социальной инфраструктурой, имеющие важное промышленное, историческое значение, а также перспективы дальнейшего развития и роста численности населения.

Так, в одном из населенных пунктов Минской обл. с численностью населения 75 тыс. человек действующие ОССВНП проектной производительностью 26,5 тыс. м³/сут. фактически пропускают 27,5 тыс. м³/сут. сточных вод, 55 % из которых составляют производственные сточные воды преимущественно предприятий по производству продуктов питания и напитков.

Загрязняющими веществами и показателями, превышения допустимых концентраций по которым чаще других фиксировались при их сбросе в централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов, являются: хлорид-ион, взвешенные вещества, минерализация воды, рН, ХПК, железо общее, СПАВ, нефтепродукты, азот аммонийный и соединения фосфора. При этом организациями

⁹Водный кодекс Республики Беларусь: 30 июля 2014 г., №149-З : Принят Палатой представителей 2 апреля 2014 г. : одобр. Советом Респ. 11 апреля 2014 г. : в ред. Закона Респ. Беларусь от 18.06.2019 г. // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь. Минск: Национальный центр правовой информации Республики Беларусь, 2019.

¹⁰Об утверждении Правил пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 30 сен. 2016 г., № 788 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600788&p1=1> (дата обращения: 25.09.2022).

ВКХ в ряде населенных пунктов в 2021 г. зафиксированы максимальные концентрации загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод при приеме в централизованные системы водоотведения (канализации) превысившие допустимые нормативные значения:

- по хлорид-иону – в 93 раза (фактическое значение показателя составило 27931 мг/дм³ при допустимом значении 300 мг/дм³);
- по взвешенным веществам – в 39 раз (фактическое значение показателя составило 9790 мг/дм³ при допустимом значении 250 мг/дм³);
- по ХПК – в 11 раз (фактическое значение показателя составило 7475 мг/дм³ при допустимом значении 700 мг/дм³);
- по железу общему – в 16 раз (фактическое значение показателя составило 93,3 мг/дм³ при допустимом значении 5,8 мг/дм³);
- по азоту аммонийному – в 9 раз (фактическое значение показателя составило 230 мг/дм³ при допустимом значении 25 мг/дм³);
- по фосфору – в 17 раз (фактическое значение показателя составило 60,6 мг/дм³ при допустимом значении 3,5 мг/дм³).

За счет внушительного запаса производственных мощностей значительная часть ОССВНП обеспечивает очистку сточных вод перед сбросом в поверхностные водные объекты, однако имеют место случаи нарушения природоохранного законодательства. Так, по данным Государственного водного кадастра за 2021 г. в поверхностные водные объекты организациями ВКХ сброшено 545,8 млн м³ сточных вод, 2 млн м³ (0,37 %) из которых недостаточно очищенные сточные воды, то есть сточные воды, прошедшие очистку на очистных сооружениях, но состав и свойства которых не соответствуют установленным нормативам качества для их сброса в поверхностные водные объекты.

Еще одной актуальной проблемой эксплуатации ОССВНП является отсутствие подходов к нормативному правовому регулированию обращения с осадками ОССВНП, в том числе, в части установления норм и требований, которые позволяли бы обоснованно подходить к выбору способов их подготовки к использованию и использования.

Для обработки и использования осадков сточных вод в мировой практике апробировано множество технологий и оборудования. Разнообразие технологических решений обусловлено сложным многокомпонентным составом и уникальным набором свойств, характерных для осадков ОССВНП, однако из-за отсутствия согласованного всеми сторонами, задействованными в системе обращения с осадками ОССВНП, плана действий, в Республике Беларусь реализовано лишь несколько проектов по обращению с осадками ОССВНП: комплекс сооружений по стабилизации осадка в г. Барановичи Брестской обл., биогазовый комплекс в г. Слоним Гродненской обл., площадки компостирования в г. Витебске.

При разработке проектов строительства, реконструкции ОССВНП, согласно требованиям¹¹ в составе некоторых объектов предусматривается механическое обезвоживание осадков, однако такой подход не решает проблему накопления осадков на объектах хранения ввиду отсутствия обоснованных вариантов их дальнейшего использования.

В настоящее время в стране назрела необходимость проведения работ по комплексному исследованию состава и свойств накопленных и образующихся осадков ОССВНП и разработки научно обоснованных норм и требований к выбору способов обработки осадков ОССВНП и направлений их дальнейшего использования.

При разработке проектов строительства, реконструкции объектов ОССВНП необходимо применять комплексный подход, направленный на повышение эффективности очистки сточных вод с одновременным внедрением передовых технологий по обращению с осадками.

Одной из приоритетных задач отрасли водопроводно-канализационного хозяйства на ближайшие 5 лет является повышение качества очистки сточных вод и надежности систем водоотведения¹². Решение поставленной задачи планируется осуществить путем строительства, реконструкции ОССВНП.

Для реализации этой задачи на уровне стране в составе подпрограммы 5 «Чистая вода» Государственной программы «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2021–2025 гг. запланированы реконструкция и строительство 70 объектов (табл. 2).

¹¹ СН 4.01.02-2019 «Канализация. Наружные сети и сооружения». Минск: Изд-во Минстройархитектуры, 2020. 68 с.

¹² О Государственной программе «Комфортное жилье и благоприятная среда» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 янв. 2021 г., № 50 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100050> (дата обращения: 25.09.2022).

Строительство, реконструкция очистных сооружений сточных вод населенных пунктов

Table 2

Construction, reconstruction of wastewater treatment plants in settlements

Область	Запланировано объектов к реализации в 2021–2025 гг., ед.	Реализовано объектов на 01.09.2022 г., ед.
Брестская область	16	2
Витебская область	12	1
Гомельская область	6	0
Гродненская область	5	0
Минская область	21	1
Могилевская область	9	1
г. Минск	1	0
Итого	70	5

Таким образом, до конца 2025 г. необходимо выполнить строительство, реконструкцию 65 объектов ОССВНП. В этой связи, с целью минимизации рисков, связанных с принятием неэффективных и дорогостоящих решений при реконструкции и строительстве ОССВНП, необходимо оперативно определить основные критерии и требования к выбору технологических решений на стадии подготовки предпроектной (предынвестиционной) и проектно-сметной документации.

Выбор технологических решений должен быть основан на комплексной оценке критериев, характеризующих основные параметры эффективности работы ОССВНП, и направлен:

- на решение основных проблем эксплуатации ОССВНП;
- на повышение эффективности очистки сточных вод (на уменьшение и (или) предотвращение поступления загрязняющих веществ в окружающую среду);
- на внедрение в технологическую схему очистки сточных вод прогрессивных решений по обращению с осадками, обеспечивающих нормативы качества окружающей среды и допустимого воздействия на окружающую среду.

Заключение

На основании вышеизложенного, основными критериями при формировании подходов к выбору технологических решений при строительстве, реконструкции очистных сооружений сточных вод населенных пунктов могут быть:

- производственная мощность (производительность) как один из основных технологических параметров ОССВНП, который может стать основой для внедрения классификации ОССВНП, систематизации данных о применяемых технологических решениях, анализа их эффективности и выявления наилучших доступных технических методов очистки сточных вод применительно к ОССВНП;
- уровень использования производственной мощности как один из критериев комплексной оценки при прочих равных условиях, который может стать индикатором при принятии решений о реконструкции (модернизации) существующих ОССВНП или строительстве новых;
- уровень износа как основной критерий при принятии решений о частичной или полной замене сооружений и оборудования ОССВНП, который должен быть оценен по фактическому техническому состоянию сооружений и оборудования;
- соотношение поступающих на очистные сооружения хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод как один из критериев, позволяющих избежать завышенных объемов капитальных и эксплуатационных затрат при строительстве, реконструкции ОССВНП и один из инструментов информационного обеспечения принятия управленческих решений местными исполнительными и распорядительными органами по организации схемы водоотведения (канализации) на территории соответствующего населенного пункта и необходимости строительства локальных очистных сооружений сточных вод на промышленных предприятиях;
- качественный и количественный состав производственных сточных вод как один из критериев при принятии технологических решений по очистке сточных вод и обращению с осадками (состав сооружений

и оборудования, применяемые технологии), а также решений по внедрению автоматизированных систем управления технологическим процессом очистки сточных вод и автоматизации производственного контроля за работой ОССВНП;

– качественные и количественные характеристики образующегося осадка как основной критерий при принятии технологических решений по обращению с осадками ОССВНП, обеспечивающих нормативы качества окружающей среды и допустимого воздействия на окружающую среду;

– требования к нормативам сброса очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты как один из основных критериев при принятии технологических решений, обеспечивающих эффективность очистки сточных вод (уменьшение и (или) предотвращение поступления загрязняющих веществ в окружающую среду).

Библиографические ссылки

1. Марцуль ВН, Конон ОА, Ахмадиева ЮИ. Совершенствование нормативного правового регулирования в области обращения с осадками очистных сооружений в Республике Беларусь. В: *Новые методы и технологии обращения с отходами. Органическая часть коммунальных отходов*. Минск: БГТУ; 2021. с. 122–126.
2. Голод ЮВ, Дубенок СА. Совершенствование подходов к нормированию сбросов сточных вод в окружающую среду через системы канализации населенных пунктов. *Природные ресурсы*. 2021;2:49–58.
3. Ануфриев ВН. Очистные сооружения сточных вод: классификация в соответствии с новым стандартом. *Экология на предприятии*. 2015;6:51–60.
4. Голод ЮВ, Дубенок СА. Нормирование производственных сточных вод, отводимых в централизованную систему водоотведения населенных пунктов Республики Беларусь. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2021;2:81–85.

References

1. Martsul VN, Konon OA, Akhmadziyeva YI. *Sovershenstvovaniye normativnogo pravovogo regulirovaniya v oblasti obrashcheniya s osadkami ochistnykh sooruzheniy v Respublike Belarus* [Improvement of regulatory legal regulation in the field of treatment of sludge from sewage treatment plants in the Republic of Belarus]. In: *Novyye metody i tekhnologii obrashcheniya s otkhodami. Organicheskaya chast' kommunal'nykh otkhodov* [New methods and technologies for waste management. Organic part of municipal waste]. Minsk: BSTU; 2021. p. 122–126. Russian.
2. Golod YuV, Dubianok SA. *Sovershenstvovaniye podkhodov k normirovaniyu sbrosov stochnykh vod v okruzhayushchuyu sredu cherez sistemy kanalizatsii naseleennykh punktov* [Improving approaches to the regulation of wastewater discharges into the environment through the sewerage systems of settlements]. *Natural resources*. 2021;2:49–58. Russian.
3. Anufriev VN. *Ochistnyye sooruzheniya stochnykh vod: klassifikatsiya v sootvetstvi s novym standartom* [Wastewater treatment plants: classification according to the new standard]. *Ecology at the enterprise*. 2015;6:51–60. Russian.
4. Golod YuV, Dubianok SA. *Normirovaniye proizvodstvennykh stochnykh vod, otvodimykh v tsentralizovannuyu sistemu vodootvedeniya naseleennykh punktov Respubliki Belarus* [Rationing of industrial wastewater discharged into the centralized sewerage system of settlements of the Republic of Belarus]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021;2:81–85. Russian.

Статья поступила в редколлегию 26.09.2022.
Received by editorial board 26.09.2022.

УДК 541.15:539.163

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ДОСТУПНОСТЬ ^{137}Cs И ^{90}Sr В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ В ОТДАЛЕННЫЙ ПЕРИОД АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Н. Н. ЦЫБУЛЬКО¹⁾, Ю. В. ПУТЯТИН²⁾

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

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

Изучена биологическая доступность ^{137}Cs и ^{90}Sr в дерново-подзолистых автоморфных и полугидроморфных (глеватых) почвах разного гранулометрического состава (суглинистые, супесчаные, песчаные). Установлено, что за длительный послеварийный период произошла трансформация в почвах физико-химических форм ^{137}Cs и ^{90}Sr , наступило динамическое равновесие в их содержании. Соединения ^{137}Cs подверглись необменной фиксации, и содержание их в доступной для растений форме составляет в настоящее время незначительную долю – 5–15 %. Соединения ^{90}Sr , наоборот, находятся преимущественно в легкодоступных формах, составляющих в дерново-подзолистых почвах от 60 до 75 %, в среднем – 67 %. Коэффициенты перехода ^{137}Cs сократились в зависимости от гранулометрического состава почв в зерновые культуры в 3,0–6,7 раза, и клубни картофеля – в 5,0–7,5 раза. Параметры поступления ^{90}Sr в растения наиболее интенсивно снижались в первые 1–2 года после аварийных выпадений, что обусловлено в основном трансформацией его водорастворимых соединений в обменные формы, а за последние 30–36 лет практически не уменьшились. В связи с высокой подвижностью ^{90}Sr в почве коэффициенты перехода его в сельскохозяйственные культуры существенно выше по сравнению с ^{137}Cs – в зерновые культуры более чем на порядок, в картофель – в среднем в 5 раз. В настоящее время параметры биологической доступности ^{137}Cs и ^{90}Sr стабилизировались и не наблюдается их существенных изменений. Таким образом, исходя из современной ситуации и коэффициентов перехода этих радионуклидов из почвы в растения, можно заключить, что основные проблемы, связанные с получением нормативно чистой продукции растениеводства, могут возникать на почвах, загрязненных ^{90}Sr .

Ключевые слова: дерново-подзолистые почвы; гидроморфизм; гранулометрический состав; ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; формы содержания; коэффициенты перехода.

BIOLOGICAL AVAILABILITY OF ^{137}CS AND ^{90}SR IN SODDY-PODZOLIC SOILS IN THE LONG PERIOD OF THE ACCIDENT AT THE CHERNOBYL NPP

M. M. TSYBULKA^a, Yu. V. PUTYATIN^a

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

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

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

Образец цитирования:

Цыбулько НН, Путятин ЮВ. Биологическая доступность ^{137}Cs и ^{90}Sr в дерново-подзолистых почвах в отдаленный период аварии на Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;4:108–117. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-108-117>

For citation:

Tsybulka MM, Putyatin YuV. Biological availability of ^{137}Cs and ^{90}Sr in soddy-podzolic soils in the long period of the accident at the Chernobyl NPP. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;4:108–117. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-4-108-117>

Авторы:

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

Юрий Викторович Путятин – доктор сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий лабораторией мониторинга плодородия почв и экологии.

Authors:

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

nik.nik1966@tut.by

Yury V. Putyatin, doctor of science (agriculture), docent; head of the laboratory of monitoring soil fertility and ecology.

put@tut.by

The content of ^{137}Cs and ^{90}Sr forms in soddy-podzolic automorphic and gleyic soils of different textures (loamy, sandy loamy, sandy) was studied. It has been established that over a long post-accident period, the physical and chemical forms of ^{137}Cs and ^{90}Sr have been transformed in soils, and a dynamic balance has come in their content. ^{137}Cs compounds have undergone non-exchange fixation, and their content in the form available to plants is currently an insignificant fraction – 5–15 %. ^{90}Sr compounds, on the contrary, are predominantly in easily accessible forms, which make up from 60 to 75 % in soddy-podzolic soils, 67 % on average. The transfer factor of ^{137}Cs , depending on the granulometric composition of soils, decreased on average in grain crops by 3.0–6.7 times, in potato tubers – by 5.0–7.5 times. The parameters of ^{90}Sr intake into plants decreased most intensively in the first 1–2 years after the accidental fallout, which was mainly due to the transformation of its water-soluble compounds into exchangeable forms, and over the past 30–36 years they have not practically decreased. Due to the high mobility of ^{90}Sr in the soil, the transfer factor into agricultural crops are significantly higher compared to ^{137}Cs – into grain crops by more than an order of magnitude, into potatoes – by an average of 5 times. Currently, the bioavailability parameters of ^{137}Cs and ^{90}Sr have stabilized and no significant changes are observed. Therefore, based on the current situation and the transfer coefficients of these radionuclides from soil to plants, it can be concluded that the main problems associated with obtaining standard clean crop products can occur on soils contaminated with ^{90}Sr .

Keywords: soddy-podzolic soils; hydromorphism; granulometric composition; ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; content forms; transfer factor.

Введение

Система «почва – растение» – начальное звено экологического цикла и миграции радионуклидов по сельскохозяйственным и пищевым цепочкам. Подвижность и биогеохимический круговорот радиоактивных изотопов зависит от физико-химических характеристик радиоактивных выпадений и последующих процессов их трансформации, свойств почв, которые влияют на процессы поглощения и закрепления.

Биологическая доступность радионуклидов в значительной степени обусловлена состоянием и формами содержания их в почве. Радионуклиды в почве могут находиться в составе как жидкой, так и твердой фазы. В растворе радионуклид содержится в виде катиона, входит в состав комплексных соединений и коллоидных частиц, а в твердой фазе – в обменно-сорбированном состоянии, то есть в адсорбционно-десорбционном равновесии с жидкой фазой почвы. Радионуклиды могут также входить в состав нерастворимых соединений или выпавших топливных частиц или необратимо сорбироваться. Показателем распределения радионуклидов между твердой и жидкой фазами почвы является коэффициент распределения (K_D), представляющий отношение равновесной концентрации радионуклида в твердой фазе к его концентрации в растворе [1].

Растения потребляют из почвы подвижные формы радионуклидов в основном из почвенного раствора. Интенсивность перехода радионуклидов в растения зависит от содержания их и других элементов в почве, а распределение между твердой фазой почвы и почвенным раствором определяется процессами сорбции – десорбции, осаждения – растворения труднорастворимых соединений, коагуляции – пептизации коллоидных частиц.

По принятой классификации доступными (в разной степени) считаются три формы радионуклидов в почве: водорастворимая (извлекаемая дистиллированной водой), обменная и подвижная. Неподвижная (фиксированная) форма радионуклида считается недоступной для растений. В водную вытяжку переходят, как правило, растворимые комплексные соединения радионуклидов, находящиеся с компонентами почвы в нейтральной и (или) анионной форме, а также катионы, десорбирующиеся из почвы по механизму ионного обмена. В ацетатаммонийную вытяжку поступают в основном соединения, сорбированные в почвенно-поглощающем комплексе по механизму ионного обмена. Слабым раствором соляной кислоты извлекаются соединения, находящиеся в почве в необменном состоянии и не переходящие в почвенный раствор в обычных условиях. Сюда включаются соединения, входящие в состав топливных частиц и нерастворимых радионуклид-органических комплексов. Все эти формы считаются подвижными. Прочно-фиксированная форма недоступна для растений и включает радионуклиды, закрепленные в межпакетных пространствах кристаллической решетки глинистых минералов.

В аварийных выпадениях цезий находился в прочносвязанной форме в составе твердых топливных частиц. Значительная его часть являлась компонентом аэрозолей (конденсационных выпадений), что характерно для удаленных от реактора районов. На территории Беларуси это районы северной части Гомельской обл. и районы Могилевской обл., где отношение $^{137}\text{Cs}:^{90}\text{Sr}$ составляет 1:350, тогда как на юге Гомельской обл. – 1:10–20 [2].

Поверхностный контакт и перемешивание радиоактивных частиц с почвой привело к их трансформации – выщелачиванию из связанного состояния, сорбции почвенным поглощающим комплексом, оксидами металлов и минералами [3]. Установлено [4], что доступность ^{137}Cs в почвах 30-километровой зоны – в 1988–1989 гг. составляла в среднем 59, а за ее пределами – 74 % по сравнению с доступностью внесенного водорастворимого радионуклида. В первый послеаварийный период (1987–1988 гг.) содержание ^{137}Cs в водорастворимой форме в пахотных и целинных почвах было в 2–3 раза выше, чем обменных форм, а спустя 6–8 лет после аварии содержание обменных форм, по данным разных авторов, уменьшилось в 1,9–27,9 раза [5].

Поведение в почве и доступность растениям ^{137}Cs отличается тем, что он активно сорбируется (фиксируется) ее твердой фазой, особенно в первый период после поступления в почву. Ионнообменные сорбционные места для Cs^+ подразделяются на 3 основных типа по степени селективности: неселективные сорбционные центры (Regular Exchange Sites, RES), расположенные на поверхности твердой фазы почвы; сорбционные центры (Frayed Edge Sites, FES), которые расположены между слоями кристаллической решетки в области расширения их краев; и центры особо высокой селективности (High Affinity Sites, HAS) [6].

В результате физико-химических процессов происходит ионнообменное связывание ^{137}Cs и необменная сорбция твердой фазой почвы. Принято считать, что необменная фиксация ^{137}Cs обусловлена взаимодействием ионов цезия с кристаллической решеткой глинистых минералов. Поэтому важную роль играют минералогический и гранулометрический состав почв, структура глинистых минералов, форма и размеры частиц, содержание их в почвах [4].

Фиксация ^{137}Cs представляет собой процесс изменения форм связи его с почвой, зависящий от почвенно-метеорологических условий. Истинная фиксация или вхождение цезия в межпакетные пространства кристаллических решеток глинистых минералов и удержание в них составляет незначительную часть от всего сорбированного почвой ^{137}Cs [7].

Процессы фиксации ^{137}Cs протекают медленнее в органогенных почвах (торфяные и др.) по сравнению с минеральными (дерново-подзолистые, серые лесные и др.), так как органические молекулы, адсорбируясь на поверхности глинистых частиц, закрывают доступ радионуклиду, препятствуя процессу его сорбции на сорбционных центрах между краями кристаллической решетки (FES) и диффузии внутрь решетки [8].

Поведение в почве и доступность растениям ^{90}Sr отличается от ^{137}Cs . Если при сорбции ^{137}Cs решающую роль играет изоморфное замещение в кристаллической решетке глинистых минералов, то для ^{90}Sr – изоморфное замещение в минералах, содержащих кальций и магний – кальцит и известняк (CaCO_3), гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), доломит ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Главным механизмом поглощения ^{90}Sr твердой фазой почвы является ионный обмен. Основная масса этого радионуклида выпала на почвенный покров в виде топливных частиц. Часть его вступила во взаимодействие с почвенным поглощающим комплексом и участвовала в процессах сорбции и комплексообразования с минеральными и органическими компонентами почвы. Нерастворимая фракция ^{90}Sr на начальном этапе не участвовала в обменных процессах с почвенным поглощающим комплексом, а водорастворимая – постепенно перешла в обменную форму. В настоящее время содержание доступных форм (преимущественно обменной формы) ^{90}Sr в дерново-подзолистых почвах достигает 70, в торфяно-болотных почвах – 50 %¹.

Цель исследования: изучить содержание различных форм ^{137}Cs и ^{90}Sr в дерново-подзолистых почвах разного гидроморфизма и гранулометрического состава в отдаленный период аварии на Чернобыльской АЭС.

Материалы и методы исследования

Объекты исследования – почвы пахотных, луговых и залежных земель, подверженные загрязнению ^{137}Cs и ^{90}Sr , включая дерново-подзолистые автоморфные супесчаные почвы на водно-ледниковых рыхлых супесях, сменяемых песками, с глубины 0,3 м и подстилаемых с глубины 0,7 м моренной супесью; дерново-подзолистые глееватые супесчаные почвы на водно-ледниковых рыхлых супесях, сменяемых песками, с глубины 0,3 м; дерново-подзолистые супесчаные почвы, подстилаемые с глубины 0,7 м моренным суглинком; дерново-подзолистые оглеенные внизу песчаные почвы на связном песке, подстилаемые с глубины 0,4 м рыхлым песком; дерново-подзолистые глееватые суглинистые почвы на маломощном суглинке, подстилаемые с глубины 0,5 м супесью.

Отбор проб почвы для анализа проводили согласно методике². Определение удельной активности ^{137}Cs (Бк/кг) в исследуемых почвенных пробах выполняли на γ -спектрометре МКС-АТ1315. Основная относительная погрешность измерений при доверительном интервале $P = 95\%$ не превышала 15–30%. Аппаратурная ошибка измерений не превышала 15%. Радиохимическое выделение ^{90}Sr проводили по МВИ. МН 1932-2003^{3,4} с радиометрическим окончанием на низкофоновом α - β -счетчике *Canberra-S5E* с погрешностью не более 20%. Формы ^{137}Cs в почве определяли методом последовательного экстрагирования по Ф. И. Павлоцкой. Подвижные и кислоторастворимые формы определяли последовательной обработкой почв дистиллированной H_2O (водорастворимая форма), 1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (обменная

¹ 35 лет после чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления ее последствий: национальный доклад Республики Беларусь / Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Минск: ИВЦ Минфина, 2020. 152 с.

² ГОСТ 28168-89. Почвы. Отбор проб. Введ. 01.04.90. Москва: Изд-во стандартов, 1989. 6 с.

³ СТБ 1059.98. Радиационный контроль. Подготовка проб для определения ^{90}Sr и ^{137}Cs . Введ. 01.07.1998. Минск: Белстандарт, 1998. 22 с.

⁴ МВИ. МН 1932-2003. Методика радиохимического определения удельной активности ^{90}Sr в почвах и растениях без разделения в системе «стронций – кальций». Минск, 2003.

и легкорастворимая форма), 1М НСl (подвижная форма) и 6М НСl (кислоторастворимая форма). Соотношение твердой и жидкой фаз составляло 1:5.

Результаты исследования и их обсуждение

Количественные параметры подвижности и биологической доступности радионуклидов оцениваются на основании двух показателей – содержания их доступных растениям соединений в почве и величине коэффициентов перехода в растения (K_n или TF – трансфер-фактор), представляющий отношение концентрации радионуклида в растении к плотности загрязнения почвы этим радионуклидом в расчете на единицу площади.

Биологическая доступность радионуклидов с течением времени меняется. За послеаварийный период наибольшей трансформации подверглись физико-химические формы ^{137}Cs . Выявлена тенденция снижения доли водорастворимых и обменных форм, доступных для растений, и увеличения доли фиксированных малодоступных форм.

Подвижность радионуклидов в почве определяется во многом такими генетическими свойствами почв, как степень гидроморфизма, гранулометрический состав. Исследования на дерново-подзолистых супесчаных автоморфной и глееватой почвах показали, что в водную вытяжку переходит 0,7–1,1 % ^{137}Cs от общего его содержания. Это, как правило, растворимые комплексные его соединения, находящиеся с компонентами почвы в нейтральной и (или) анионной форме, а также катионы ^{137}Cs , десорбирующиеся из почвы по механизму ионного обмена. В ацетат-аммонийную вытяжку поступает 4,9–5,1 % ^{137}Cs , представляющие в основном соединения, сорбированные в почвенно-поглощающем комплексе по механизму ионного обмена. Слабым раствором соляной кислоты извлекалось 3,5–4,7 % от общего содержания ^{137}Cs . Это соединения, которые находятся в почве в необменном состоянии и не переходят в почвенный раствор в обычных условиях. Сюда включаются также соединения, входящие в состав топливных частиц и нерастворимых радионуклид-органических комплексов. Все эти формы принято считать подвижными. В целом содержание доступных форм (водорастворимая, обменная, подвижная) ^{137}Cs составляло в среднем 9–11, недоступных форм (фиксированная) – 89–91 % (табл. 1).

Между автоморфной и глееватой почвами различия по содержанию форм ^{137}Cs отмечались только по водорастворимой и подвижной формам. Автоморфная почва характеризовалась более высоким содержанием водорастворимой и меньшим – подвижной формы. Водорастворимая, обменная и подвижная формы ^{137}Cs доступные растениям.

Таблица 1

Содержание форм ^{137}Cs в дерново-подзолистых супесчаных почвах разного гидроморфизма (в % от общей концентрации)

Table 1

Content of ^{137}Cs forms in sod-podzolic sandy loam soils of various hydromorphisms (in % of total concentration)

Почва по степени гидроморфизма	Загрязнение почв ^{137}Cs	Доступные формы			Недоступная (фиксированная) форма
		водорастворимая	обменная	подвижная	
Пахотные земли					
Автоморфная	*1750,6/525	1,1	4,9	3,5	90,5
Глееватая	1581,0/474	0,7	5,1	4,7	89,5
Залежные земли					
Автоморфная	2211,6/840	1,6	8,3	4,9	85,2
Автоморфная	3475,0/992	1,5	11,4	6,1	81,0

*Примечание. Над чертой – удельная активность ^{137}Cs в почве, Бк/кг, под чертой – плотность загрязнения ^{137}Cs , кБк/м²

На выведенных из сельскохозяйственного пользования после чернобыльской катастрофы необрабатываемых землях также установлено, что основной удельный вес ^{137}Cs представлен прочно фиксированными соединениями, занимающими 81,0–85,2 % от общего его содержания, а доступные растениям формы занимают 14,8–19 % [9].

Практический интерес представляют водорастворимая и обменная формы, поскольку они в первую очередь поглощаются растениями и определяют загрязнение продукции. Как показали исследования, в составе доступных растениям соединений наибольшую долю занимают обменные формы ^{137}Cs (4,9–5,1 %), несколько меньше – подвижные (3,5–4,7 %) и очень незначительную – водорастворимые формы (0,7–1,1 %). На необрабатываемых землях отмечено более высокое процентное содержание по сравнению с пахотными землями обменных форм ^{137}Cs , содержащихся в почвенном поглощающем комплексе (ППК), которое составляет 8,3–11,4 %. Это обусловлено меньшей необменной фиксацией радионуклида.

Основная масса ^{90}Sr выпала на почвенный покров в виде топливных частиц. Часть его вступила во взаимодействие с ППК и участвовала в процессах сорбции и комплексообразования с минеральными и органическими компонентами почвы. Нерастворимая его фракция на начальном этапе не участвовала в обменных процессах с ППК, а водорастворимая – постепенно перешла в обменную форму. Преобладающим механизмом поглощения ^{90}Sr твердой фазой почвы является ионный обмен, аналогично адсорбции стабильного Sr и Ca, а его сорбция зависит от концентрации в почве других катионов. Установлен следующий ряд влияния конкурирующих катионов на сорбцию ^{90}Sr твердой фазой почвы: $\text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+} > \text{NH}_4^{+} > \text{Na}^{+}$ [13].

В исследованиях на дерново-подзолистых супесчаных почвах с плотностью загрязнения ^{90}Sr 74–93 кБк/м² установлено, что в водную вытяжку переходит 0,9–1,7 % ^{90}Sr от общего его содержания, в обменной форме находится 52,0–60,2 %, подвижной – 30,6–33,7 и неподвижной – 5,2–15,7 %. В целом от 84 до 95 % радионуклида находилось в доступных для растений формах (табл. 2).

Таблица 2

Содержание форм ^{90}Sr в дерново-подзолистых супесчаных почвах (в % от общей концентрации)

Table 2

Content of ^{90}Sr forms in sod-podzolic sandy loam soils (in% of total concentration)

Загрязнение почвы ^{90}Sr	Доступные формы			Недоступная форма
	водорастворимая	обменная	подвижная	
155,0/74	1,7	52,0	30,6	15,7
253,7/93	0,9	60,2	33,7	5,2

*Примечание. Над чертой – удельная активность ^{90}Sr в почве, Бк/кг, под чертой – плотность загрязнения ^{90}Sr , кБк/м².

Изучено влияние гранулометрического состава почв на содержание в них разных форм ^{137}Cs . Исследования проводили с образцами дерново-подзолистых суглинистой, супесчаной и песчаной почв, отобранных на пахотных землях в Наровлянском и Хойникском районах Гомельской обл. Для оценки прочности связи ^{137}Cs с почвой определяли содержание различных форм методом последовательного экстрагирования (табл. 3).

Таблица 3

Содержание форм ^{137}Cs в пахотном горизонте (0–20 см) дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава

Table 3

The content of forms ^{137}Cs in the arable horizon (0–20 cm) of sod-podzolic soils of different granulometric composition

Вытяжки, форма радионуклида	Удельная активность, Бк/кг	Погрешность измерения, %	Доля от валового содержания, %
Дерново-подзолистая оглеенная внизу песчаная почва на связанном песке, подстилаемая с глубины 0,4 м рыхлым песком (Наровлянский р-н, Гомельская обл.)			
Водная вытяжка (водорастворимая форма)	0,7	±30	0,1
1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (обменная форма)	119	±7	10,8
1 М HCl (подвижная форма)	140	±6	12,7
6 М HCl (кислоторастворимая форма)	820	±6	74,5
Остаточная форма	21,2	±7	1,9
Дерново-подзолистая супесчаная почва, подстилаемая с глубины 0,7 м моренным суглинком (Хойникский р-н, Гомельская обл.)			
Водная вытяжка (водорастворимая форма)	0,4	±30	0,1
1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (обменная форма)	23,6	±7	5,0
1 М HCl (подвижная форма)	25,8	±7	5,5
6 М HCl (кислоторастворимая форма)	408	±6	87,4
Остаточная форма	9,5	±8	2,0
Дерново-подзолистая глееватая суглинистая на маломощном суглинке почва, подстилаемая с глубины 0,5 м супесью (Хойникский р-н, Гомельская обл.)			
Водная вытяжка (водорастворимая форма)	11	±8	0,4
1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (обменная форма)	109	±6	3,5
1 М HCl (подвижная форма)	228	±6	7,4
6 М HCl (кислоторастворимая форма)	2620	±6	85,3
Остаточная форма	104	±7	3,4

Установлено, что в исследуемых почвах ^{137}Cs находится в разных формах и соотношениях. Количественное распределение его по формам нахождения зависит от гранулометрического состава почвы. Основная доля радионуклида находится в прочно связанной форме, вероятнее всего, в кристаллической решетке глинистых минералов. Доля легкодоступных для растений форм (водорастворимая + обменная) составляет в дерново-подзолистой песчаной почве 10,9 %, в супесчаной почве – 5,1 и в суглинистой почве 3,9 % от валового содержания его в почве.

В дерново-подзолистой суглинистой и супесчаной почвах прочносвязанные, недоступные растениям формы радионуклида, составили соответственно 88,7 и 89,4 %, в песчаной почве несколько меньше – 76,4 %. Это обусловлено более высоким содержанием глинистых минералов в почвах суглинистого ряда. В настоящее время прочная необменная фиксация ^{137}Cs минеральными почвами определяет низкие коэффициенты перехода его в продукцию растениеводства.

Изучено влияние гранулометрического состава почв на содержание в них разных форм ^{90}Sr . Исследования проводили с образцами дерново-подзолистых легкосуглинистой, супесчаной и песчаной почв, отобранных на пахотных землях в Наровлянском и Хойникском р-нах Гомельской обл.

Как отмечалось, ^{90}Sr поглощается глинистыми минералами по механизму ионного обмена в межслоевом пространстве, постепенно замещая обменные катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+}), до момента установления равновесия. Поэтому в отличие от ^{137}Cs , среди подвижных форм ^{90}Sr в исследуемых почвах преобладали обменные и легкорастворимые формы. Удельный вес доступных растениям форм радионуклида (водорастворимая + обменная + подвижная) составил в дерново-подзолистой песчаной почве 87,4 %, в супесчаной почве – 81,2, в суглинистой почве – 92,0 % от валового его содержания. Удельный вес легкодоступных форм (водорастворимая + обменная) составил 67,2, 59,6 и 75,5 % соответственно (табл. 4).

Таблица 4

Содержание форм ^{90}Sr в пахотном горизонте (0–20 см) дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава

Table 4

The content of forms ^{90}Sr in the arable horizon (0–20 cm) of sod-podzolic soils of different granulometric composition

Вытяжки, форма радионуклида	Удельная активность, Бк/кг	Погрешность измерения, %	Доля от валового содержания, %
Дерново-подзолистая оглеенная внизу песчаная почва на связном песке, подстилаемая с глубины 0,4 м рыхлым песком (Наровлянский р-н, Гомельская обл.)			
Водная вытяжка (водорастворимая форма)	8,8	± 30	10,4
1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (обменная форма)	48,2	± 18	56,8
1 М HCl (подвижная форма)	17,1	± 30	20,1
6 М HCl (кислоторастворимая форма)	8,7	± 30	10,2
Остаточная форма	2,1	± 30	2,5
Дерново-подзолистая супесчаная почва, подстилаемая с глубины 0,7 м моренным суглинком (Хойникский р-н, Гомельская обл.)			
Водная вытяжка (водорастворимая форма)	7,4	± 30	15,9
1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (обменная форма)	20,4	± 26	43,7
1 М HCl (подвижная форма)	10,1	± 41	21,6
6 М HCl (кислоторастворимая форма)	7,8	± 40	16,6
Остаточная форма	1,1	± 40	2,2
Дерново-подзолистая глееватая суглинистая на маломощном суглинке почва, подстилаемая с глубины 0,5 м супесью (Хойникский р-н, Гомельская обл.)			
Водная вытяжка (водорастворимая форма)	9	± 35	9,1
1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (обменная форма)	65,3	± 17	66,4
1 М HCl (подвижная форма)	16,2	± 35	16,5
6 М HCl (кислоторастворимая форма)	4,1	± 40	4,2
Остаточная форма	3,7	± 47	3,8

Проведен сравнительный анализ коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr (K_n), которые были приняты в качестве нормативов для прогноза загрязнения растениеводческой продукции в рекомендациях по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель [10]. Анализировали зерновые культуры (озимая пшеница, озимая рожь, ячмень, овес) и картофель. Принимали усредненные значения K_n за 5, 10, 25 и 35-летний период после аварии при среднем содержании K_2O в дерново-подзолистых почвах 141–200 мг/кг почвы и слабокислой реакции среды с $\text{pH}_{\text{KCl}} - 5,51-6,0$.

Установлено, что за послеаварийный период произошло существенное снижение параметров миграции ^{137}Cs в системе «почва–растение». В начальный период (1987–1990 гг.) переход ^{137}Cs в зерновые культуры на почвах разного гранулометрического состава колебался от 0,05–0,15 на суглинистых почвах до 0,20–0,40 – на супесчаных и песчаных почвах. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в клубни картофеля изменялись от 0,15 на суглинистых почвах до 0,3 – на легких песчаных и супесчаных почвах (рис. 1, 2).

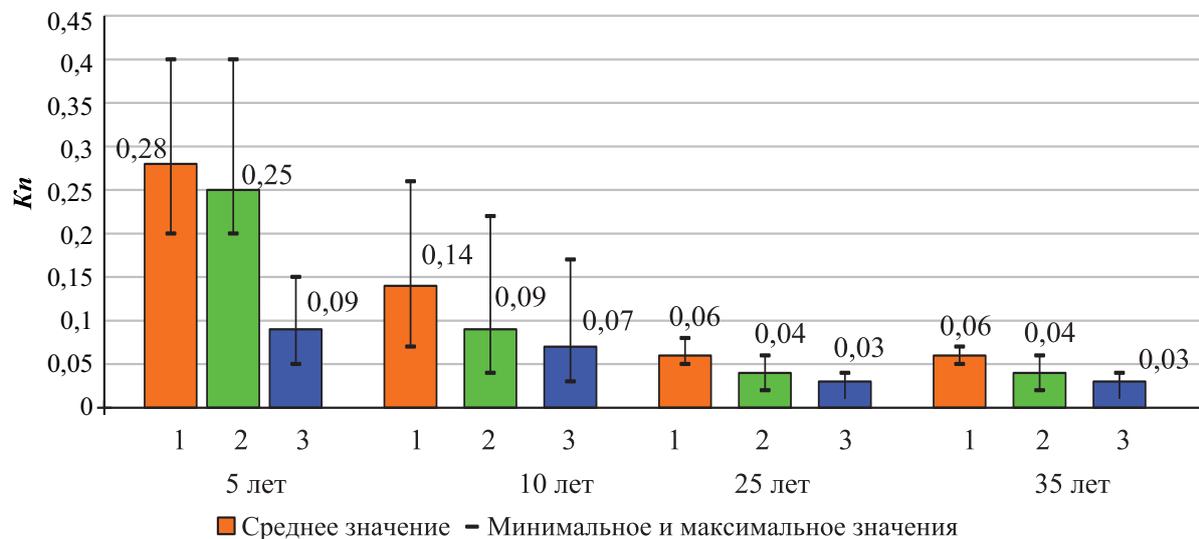


Рис. 1. Динамика коэффициентов перехода ^{137}Cs (Бк/кг: kBq/m²) из дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава в зерновые культуры: 1 – песчаная почва, 2 – супесчаная почва, 3 – суглинистая почва

Fig. 1. Dynamics of ^{137}Cs transfer coefficients (Bq/kg: kBq/m²) from soddy-podzolic soils of different granulometric composition to grain crops: 1 – sandy soil, 2 – sandy loamy soil, 3 – loamy soil

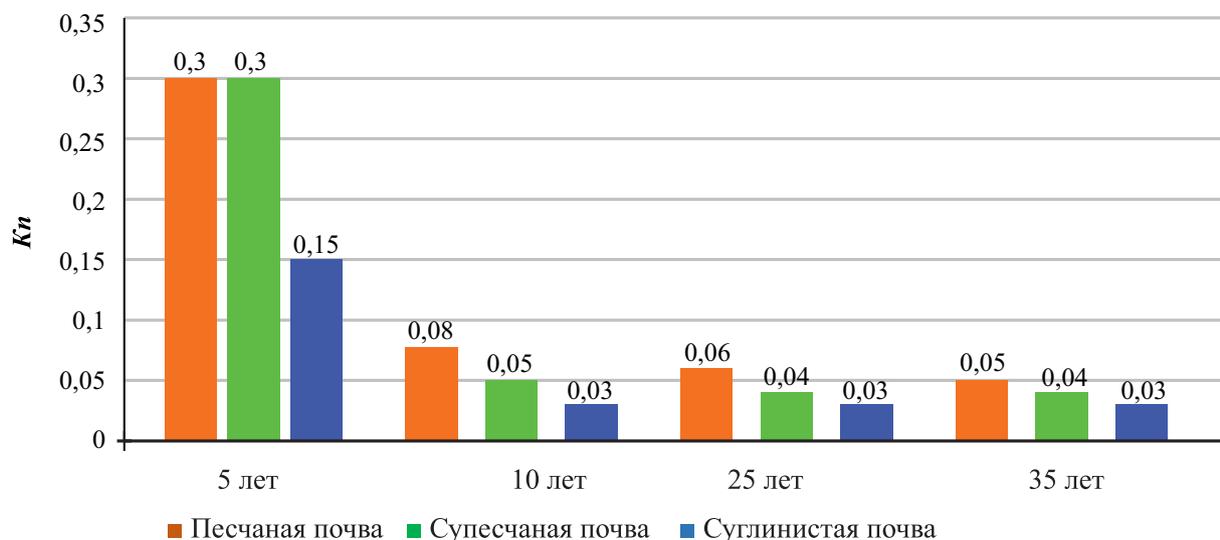


Рис. 2. Динамика коэффициентов перехода ^{137}Cs (Бк/кг: kBq/m²) из дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава в клубни картофеля

Fig. 2. Dynamics of conversion coefficients of ^{137}Cs (Bq/kg: kBq/m²) from soddy-podzolic soils of different granulometric composition to potato tubers

С течением времени по мере физико-химической трансформации ^{137}Cs в почве и уменьшения доли водорастворимых и обменных форм, доступных для растений, произошло существенное снижение коэффициентов перехода его в продукцию сельскохозяйственных культур. Спустя 10 лет после радиоактивных выпадений параметры поступления ^{137}Cs в зерновые культуры сократились в 2–3 раза на песчаных и супесчаных почвах и в 1,2–1,3 раза – на суглинистых почвах, в картофель – в 2 на песчаных почвах и в 5–6 раз – на супесчаных и суглинистых почвах, а через 25 лет – в 4,7–6,2 и 3,0–3,2 раза соответственно.

В настоящее время наступило динамическое равновесие биологической доступности ^{137}Cs в дерново-подзолистых почвах и коэффициенты перехода его в растения практически стабилизировались и изменяются незначительно.

В первый послеварийный период коэффициенты перехода ^{90}Sr в зерновые культуры из дерново-подзолистых почв колебались в зависимости от их гранулометрического состава в среднем от 1,80 до 3,25. В последующем наблюдалось их снижение в среднем в 2,5–2,7 раза на легких песчаных и супесчаных почвах и в 1,7 раза – на суглинистых почвах (рис. 3).

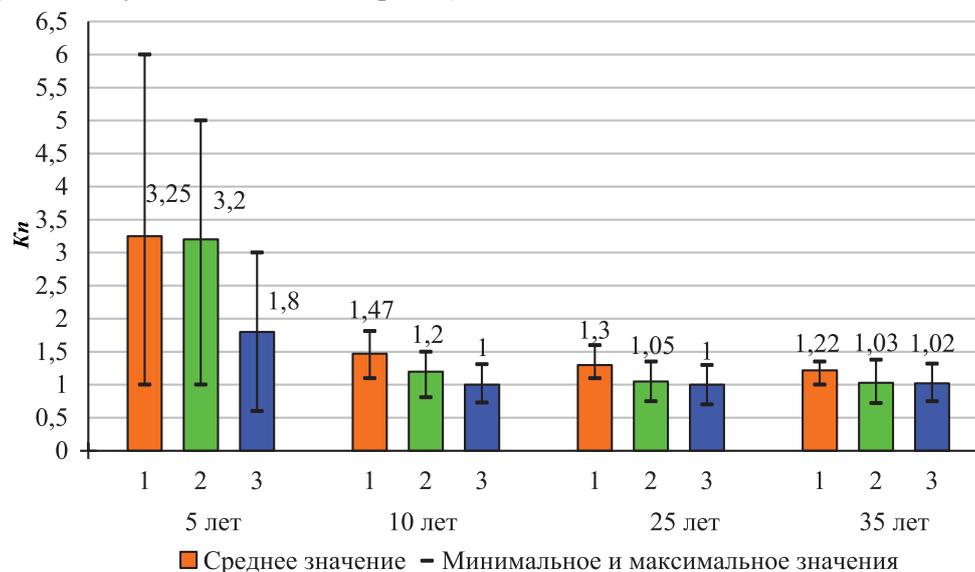


Рис. 3. Динамика коэффициентов перехода ^{90}Sr (Бк/кг: кБк/м²) из дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава в зерновые культуры: 1 – песчаная почва, 2 – супесчаная почва, 3 – суглинистая почва

Fig. 3. Dynamics of ^{90}Sr transfer coefficients (Bq/kg: kBq/m²) from soddy-podzolic soils of different granulometric composition to grain crops: 1 – sandy soil, 2 – sandy loamy soil, 3 – loamy soil

В настоящее время при оптимальных параметрах плодородия дерново-подзолистых почв коэффициенты перехода ^{90}Sr в зерновые культуры колеблются в пределах 0,72–1,32 на суглинистых почвах и 0,75–1,38 – на супесчаных и песчаных почвах. Следует отметить, что они на 2,5 порядка выше, чем коэффициенты перехода ^{137}Cs в зерновые культуры, что осложняет получение растениеводческой продукции в пределах допустимых уровней.

В начальный период после аварии высоким накоплением ^{90}Sr отличался картофель. Коэффициенты перехода составляли от 1,7 на суглинистых почвах до 3,0 – на песчаных почвах. В дальнейшем произошло существенное их снижение – в 8,5–9,0 раз (рис. 4).

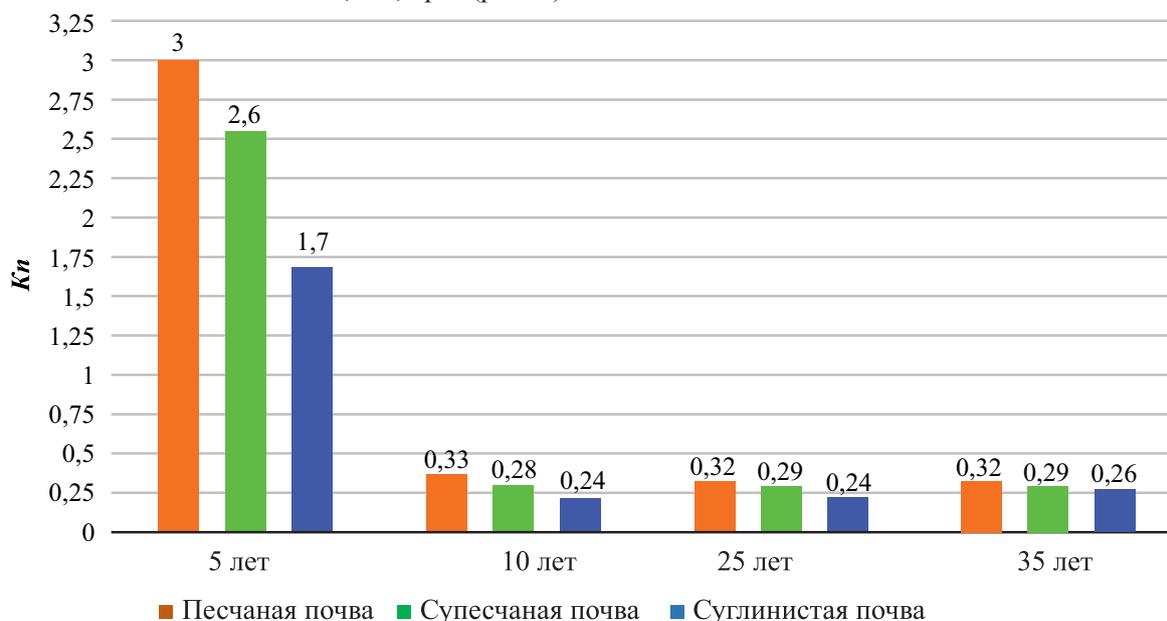


Рис. 4. Динамика коэффициентов перехода ^{90}Sr (Бк/кг: кБк/м²) из дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава в клубни картофеля

Fig. 4. Dynamics of conversion coefficients of ^{90}Sr (Bq/kg: kBq/m²) from soddy-podzolic soils of different granulometric composition to potato tubers

В настоящее время коэффициенты перехода составляют 0,26–0,32 и несущественно изменяются в зависимости от гранулометрического состава почв. В большей степени они зависят от степени кислотности почвы (pH_{KCl}). Следует также отметить, коэффициент перехода ^{90}Sr в клубни картофеля значительно (в 5 раз) выше по сравнению с ^{137}Cs .

Заключение

За длительный послеаварийный период произошла трансформация в почвах физико-химических форм ^{137}Cs и ^{90}Sr , наступило динамическое равновесие в их содержании. Соединения ^{137}Cs подверглись необменной фиксации, и содержание их в доступной для растений форме составляет незначительную долю – 5–15 %. Однако соединения ^{90}Sr находятся преимущественно в легкодоступных формах, составляющих в дерново-подзолистых почвах от 60 до 75 %, в среднем – 67 %.

За 35-летний период после аварии на Чернобыльской АЭС произошло существенное снижение биологической доступности и интенсивности миграции ^{137}Cs в системе «почва – растение» вследствие необменной фиксации и уменьшения водорастворимых и обменных форм в почве. Коэффициенты перехода его сократились на дерново-подзолистых почвах в зависимости от их гранулометрического состава в среднем в зерновые культуры в 3,0–6,7 раза, в клубни картофеля – в 5,0–7,5 раза. Параметры поступления ^{90}Sr в растения наиболее интенсивно снижались в первые 1–2 года после аварийных выпадений, что обусловлено в основном трансформацией его водорастворимых соединений в обменные формы. При этом за последние 30–35 лет они практически не уменьшились, а в некоторых случаях даже возросли. В связи с высокой подвижностью ^{90}Sr в почве (50 % и более находится в обменной форме) коэффициенты перехода его в сельскохозяйственные культуры существенно выше по сравнению с ^{137}Cs – в зерновые культуры более чем на порядок, в картофель – в среднем в 5 раз. В настоящее время параметры биологической доступности ^{137}Cs и ^{90}Sr стабилизировались и не наблюдается их существенных изменений. Поэтому, исходя из современной ситуации и коэффициентов перехода этих радионуклидов из почвы в растения, можно заключить, что основные проблемы, связанные с получением нормативно чистой продукции растениеводства, могут возникать на почвах, загрязненных ^{90}Sr .

Библиографические ссылки

1. Алексахин РМ. Радиоактивное загрязнение почв как тип их деградации. *Почвоведение*. 2009;12:1487–1498.
2. Голиков ЮН. Радиоактивная загрязненность и радиационная обстановка ландшафтных комплексов Гомельской и Могилевской областей. В: *Тезисы докладов республиканской научно-практической конференции по радиобиологии и радиоэкологии*. Минск: [б. и.]; 1990. с. 74.
3. Фесенко СВ. Оценка периодов полуснижения содержания ^{137}Cs в корнеобитаемом слое почв луговых экосистем. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1997;37(2):267–280.
4. Бондарь ПФ. Оценка относительной биологической доступности цезия-137 в выпадениях и общей биологической доступности его в почвах на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению. *Агрохимия*. 1992;2:102–110.
5. Гребенщикова НВ. Динамика биологической доступности ^{137}Cs и ^{90}Sr в луговых экосистемах Белорусского Полесья. В: *Итоги научных исследований в области радиоэкологии. Сборник научных трудов*. Гомель: [б. и.]; 1996. с. 34.
6. Cremers A, et al. Quantitative analysis of radiocaesium retention in soils. *Nature*. 1988;335(6187):247–249.
7. Шагалова ЭД. Сорбция микроколичеств цезия некоторыми почвами Белоруссии. *Почвоведение*. 1982;11:26.
8. Absalom JP, Grout NMJ, Young SD. Modeling radiocaesium fixation in upland organic soils of northwest England. *Environmental Science & Technology*. 1996;30:2735–2741.
9. Алексахин РМ и др. *Сельскохозяйственная радиоэкология*. Москва: Экология; 1992. 400 с.
10. Цыбулько НН. *Почвенно-агрохимические основы адаптивного использования загрязненных радионуклидами земель*. Минск: ИВЦ Минфина; 2022. 290 с.

References

1. Aleksakhin RM. *Radioaktivnoe zagryaznenie pochv kak tip ikh degradatsii* [Radioactive contamination of soils as a type of their degradation]. *Soil science*. 2009;12:1487–1498. Russian.
2. Golikov YuN, Datskevich PI, Dolgov VM. *Radioaktivnaya zagryaznennost' i radiatsionnaya obstanovka landshaftnykh kompleksov Gmel'skoi i Mogilevskoi oblastei* [Radioactive contamination and radiation environment of landscape complexes in the Gomel and Mogilev regions]. In: *Proceedings. report rep. scientific-practical conference in radiobiology and radioecology*. Minsk: [publisher unknown]; 1990. p. 74. Russian.
3. Fesenko SV, Spiridonov NI, Sanzharova NI. *Otsenka periodov polusnizheniya sodержaniya ^{137}Cs v korneobitaetom sloe pochv lugovykh ekosistem* [Estimation of periods of half-reduction of ^{137}Cs content in the root layer of soils of meadow ecosystems]. *Radiation biology. Radioecology*. 1997;37(2):267–280. Russian.
4. Bondar PF, YuA, Ivanov AG. *Ozornov Otsenka otositel'noi biologicheskoi dostupnosti tseziya-137 v vypadeniyakh i obshchei biologicheskoi dostupnosti ego v pochvakh na territorii, podvergsheysya radioaktivnomu zagryazneniyu* [Assessment of the relative bioavailability of cesium-137 in fallout and its total bioavailability in soils in the territory subjected to radioactive contamination]. *Agrochemistry*. 1992;2:102–110. Russian.

5. Grebenshchikova NV, Podolyak AG. *Dinamika biologicheskoi dostupnosti ^{137}Cs i ^{90}Sr v lugovykh ekosistemakh Belorusskogo Poles'ya* [Dynamics of bioavailability of ^{137}Cs and ^{90}Sr in meadow ecosystems of Belarusian Polissya]. In: *Results of scientific research in the field of radioecology*. Gomel: [publisher unknown]; 1996. p. 34. Russian.
6. Cremers A, et al. Quantitative analysis of radiocaesium retention in soils. *Nature*. 1988;335(6187):247–249.
7. Shagalova ED. *Sorbtsiya mikrokolichestv tseziya nekotorymi pochvami Belorussii* [Sorption of microquantities of cesium by some soils of Belarus]. *Soil Science*. 1982;11:26. Russian.
8. Absalom JP, Grout NMJ, Young SD. Modeling radiocaesium fixation in upland organic soils of northwest England. *Environmental Science & Technology*. 1996;30:2735–2741.
9. Aleksakhin RM, et al. *Sel'skokhozyaistvennaya radioekologiya* [Agricultural radioecology]. Moscow: Ecology; 1992. 400 p. Russian.
10. Tsybulka NN. *Pochvenno-agrokhimicheskie osnovy adaptivnogo ispol'zovaniya zagryaznennykh radionuklidami zemel* [Soil-agrochemical bases of adaptive use of lands contaminated with radionuclides]. Minsk: Information Center of the Ministry of Finance; 2022. 290 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 14.10.2022.
Received by editorial board 14.10.2022.

СОДЕРЖАНИЕ

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Ткаченко С. В., Смирнова Т. В. Система компьютерного зрения в мобильных устройствах4

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

Сергеева Т. П., Лозинская О. В., Смирнова Е. Г. Структура энтомокомплексов открытых биотопов Белорусского Полесья в постмелиоративный период 15

Углянец А. В., Гарбарук Д. К. Оценка загрязнения древесины и коры дуба ^{137}Cs в зоне отчуждения Чернобыльской атомной электростанции33

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Роздяловская Л. Ф., Николаенко Е. В., Гусейнова Д. И., Кляус В. В. Оценка доз облучения населения от жидких сбросов Белорусской АЭС в режиме нормальной эксплуатации46

Голубев А. П., Журавков В. В., Миронов В. П., Юхневич В. Л., Бодиловская О. А. Активность основных дозобразующих радионуклидов в водоемах белорусского сектора зоны Чернобыльской атомной электростанции и создаваемые ими дозовые нагрузки на биоту57

Эвентова Л. Н., Матарас А. Н., Батян А. Н., Власова Н. Г., Висенберг Ю. В. Дозы облучения населения Беларуси вследствие аварии на Чернобыльской атомной электростанции на 2021–2025 гг.70

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

Нижегородова Д. Б., Цеханович Д. А., Старостин А. М., Дыбов О. Г., Воробей А. В., Зафранская М. М. Субпопуляции циркулирующих $\gamma\delta\text{T}$ -лимфоцитов у пациентов с воспалительными заболеваниями кишечника79

Петренко С. В., Пухтеева И. В., Сидорович А. Н. Первичная заболеваемость тиреоидной системы и йодное обеспечение организма взрослого населения Заводского района г. Минска.....89

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

Ахмадиева Ю. И., Дубенок С. А. Выбор технологических решений при строительстве и реконструкции очистных сооружений сточных вод населенных пунктов.....97

Цыбулько Н. Н., Пуятин Ю. В. Биологическая доступность ^{137}Cs и ^{90}Sr в дерново-подзолистых почвах в отдаленный период аварии на Чернобыльской АЭС 108

CONTENTS

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

<i>Tkachenko S. V., Smirnova T. V.</i> Computer vision system in mobile devices.....	4
--	---

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Sergeeva T. P., Lozinskaya O. V., Smirnova E. G.</i> The structure of entomocomplexes of open biotopes of the Belarusian Polesie in the post-meliorative period	15
<i>Uglyanets A. V., Garbaruk D. K.</i> Assessment of oak wood and bark contamination by ¹³⁷ Cs in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant.....	33

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Rozdylouskaya L. F., Nikalayenka A. U., Huseinava D. I., Kliaus V. V.</i> Assessment of population exposure dose resulted from liquid discharges of Belarusian NPP in normal operation mode	46
<i>Golubev A. P., Zhuravkov V. V., Mironov V. P., Yukhnevich V. L., Bodilovskaya O. A.</i> Activity of the main dose-generating radionuclides in water bodies of the belarusian sector of the Chernobyl NPP zone and their dose loads for the biota.....	57
<i>Eventova L. N., Mataras A. N., Batyan A. N., Vlasova N. G., Visenberg Yu. V.</i> Exposure doses to the population of Belarus from the Chernobyl accident in 2021–2025.....	70

MEDICAL ECOLOGY

<i>Nizheharodava D. B., Tsekhanovich D. A., Starastin A. M., Dybau A. G., Vorobei A. V., Zafranskaya M. M.</i> Circulating $\gamma\delta$ T-lymphocytes subsets in patients with inflammatory bowel diseases	79
<i>Petrenko S. V., Puhteeva I. V., Sidorovich A. N.</i> Primary incidence of the thyroid system and iodine supply of the adult population in the Zavodskoy district of Minsk	89

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Akhmadziyeva Yu. I., Dubianok S. A.</i> Selection of technological solutions in the construction and reconstruction of wastewater treatment facilities in settlements.....	97
<i>Tsybulka M. M., Putyatin Yu. V.</i> Biological availability of ¹³⁷ Cs and ⁹⁰ Sr in soddy-podzolic soils in the long period of the accident at the Chernobyl NPP.....	108

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. 2022**

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 27.12.2022.
Тираж 100 экз. Заказ 662.

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

© БГУ, 2022

**Journal
of the Belarusian State University. Ecology.
No. 4. 2022**

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 27.12.2022.
Edition 100 copies. Order number 662.

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

© BSU, 2022