



ЖУРНАЛ  
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

# ЭКОЛОГИЯ

---

JOURNAL  
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

# ECOLOGY

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

---

# 2

# 2021

---

МИНСК  
БГУ

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- Главный редактор** **МАСКЕВИЧ С. А.** – доктор физико-математических наук, профессор; директор Международного государственного экологического института имени 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 имени 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 имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.  
E-mail: aromia@rambler.ru
- Батян А. Н.* Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
- Голубев А. П.* Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
- Головатый С. Е.* Международный государственный экологический институт имени 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.
- Зафранская М. М.* Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
- Кильчевский А. В.* Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
- Коровин Ю. А.* Обнинский институт атомной энергетики – Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Обнинск, Россия.
- Ленгфельдер Э.* Радиологический институт здоровья и окружающей среды имени Отто Хуга, Мюнхен, Германия.
- Либератос Г.* Афинский технический университет, Афины, Греция.
- Логинов В. Ф.* Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
- Медведев С. В.* ГНУ «Объединенный институт проблем информатики» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
- 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 имени 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.
- Golubev A. P.* International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
- Golovaty S. E.* 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.
- Zafranskaya M. M.* International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
- Kilchevsky A. V.* National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
- 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.
- 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.
- 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 37.013.73

### ИДЕИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ В СОДЕРЖАНИИ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫХ ДИСЦИПЛИН

Е. Н. ДЗЯТКОВСКАЯ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт стратегии развития образования Российской академии наук  
ул. Жуковского, 16, 105062, г. Москва, Россия

Рассматривается роль естественнонаучного образования в контексте современного экологического кризиса и путей выхода из него. Актуализируются особенности образования для устойчивого развития, его вызовы к обновлению содержания естественнонаучных дисциплин. Обосновываются такие векторы, как отражение современного состояния науки, фундаментальность знаний, их междисциплинарная интеграция, мировоззренческая направленность. Сделан вывод о том, что для понимания междисциплинарной концепции устойчивого развития недостаточно совокупности специальных научных картин мира. Поставлена проблема разработки естественнонаучной картины мира как экологической составляющей образования в интересах устойчивого развития. Определяются базовые категории систематизации естественнонаучных знаний: природа, материальное единство мира, развитие, система, самоорганизация, детерминизм и др. Утверждается, что естественнонаучная картина мира в ее экологическом аспекте опирается на учение В. И. Вернадского о биосфере и биогеохимической миграции атомов, учение Н. Н. Моисеева об универсальном эволюционизме и концепцию устойчивого развития. Сделано заключение о роли естественнонаучного образования в формировании ключевого понятия устойчивого развития – экологического императива.

**Ключевые слова:** естественнонаучная картина мира; материальное единство мира; развитие; система; самоорганизация; детерминизм.

---

#### Образец цитирования:

Дзятковская ЕН. Идеи устойчивого развития в содержании естественнонаучных дисциплин. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;2:4–14. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-4-14>

#### For citation:

Dzyatkovskaya EN. Ideas of sustainable development in the content of science disciplines. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;2:4–14. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-4-14>

---

#### Автор:

Елена Николаевна Дзятковская – доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории дидактики и философии образования.

#### Author:

Elena N. Dzyatkovskaya, doctor of science (biology), professor, senior researcher at the laboratory of didactics and philosophy of education. [dziatkov@mail.ru](mailto:dziatkov@mail.ru)

## IDEAS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE CONTENT OF SCIENCE DISCIPLINES

E. N. DZYATKOVSKAYA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Educational Development Strategy of the Russian Academy of Sciences  
16 Zhukovsky Street, Moscow 105062, Russia*

The article deals with the role of science education in explaining the modern environmental crisis and ways out of it. The urgency and peculiarities of education for sustainable development, its challenges to updating the content of natural science disciplines are considered. The directions of such updating are justified: reflection of modern state of science, fundamentality of knowledge, its interdisciplinary integration and worldview orientation. The conclusion is made that for understanding the interdisciplinary concept of sustainable development the set of special scientific pictures of the world is not enough. The problem of developing a natural-science picture of the world as an environmental component of education for sustainable development is posed. The article considers the basic categories of synthesis of natural-science knowledge into the natural-science picture of the world: nature, material unity of the world, development, system, self-organization, determinism, etc. It is determined that the natural scientific picture of the world, in its ecological aspect, is based on V. I. Vernadsky's doctrine on the biosphere and biogeochemical migration of atoms, N. N. Moiseev's doctrine on universal evolutionism, and the concept of sustainable development. It is concluded about the role of the natural sciences in the formation of the key concept of sustainable development – the ecological imperative.

**Keywords:** natural scientific picture of the world; material unity of the world; development, system; self-organization; determinism.

### Введение

Мировое сообщество приняло 17 целей устойчивого развития (ЦУР), которых необходимо достичь совместными действиями всех стран до 2030 г., чтобы затормозить скорость нарастания глобальных проблем [1]. Если это не получится, с 30-х гг. XXI в. может начаться совсем другой, трагический сценарий развития цивилизации. По словам Генерального секретаря ООН Антониу Гутерриш, человечество уже сегодня столкнулось с четырьмя всадниками апокалипсиса – *раздор* (геополитическая напряженность и глобальное недоверие), *голод* как результат нарастающих климатических изменений, *завоеватель* – злоупотребление новыми технологиями, риски использования искусственного разума, *смерть* – болезни цивилизации, пандемия коронавируса [2]. Неотложный характер решения глобальных проблем требует осуществления фундаментальных преобразований во всех сферах жизни общества, которые обеспечили бы движение человечества по пути устойчивого развития. Необходимым условием такого движения, способным изменить ситуацию, в которой оказалось человечество, является образование в интересах устойчивого развития (ОУР) [3]. Образование, направленное на достижение целей устойчивого развития, должно учить решать проблемы, справляться с возникающими сложностями и потенциальными рисками, формировать устойчивость к неблагоприятному воздействию и способностью системно и творчески мыслить. В связи с этим ЮНЕСКО призывает обеспечить закрепление за ОУР роли основополагающего компонента системы образования на всех ее уровнях; интегрировать принципы ОУР в общеобразовательные программы и программы профессиональной подготовки всех уровней. Важнейшим направлением обновления общего и профессионального образования является естественнонаучная область, способная объяснить закономерности изменений в биосфере, анализировать лимитирующие факторы сохранения ее экологического равновесия, изучать проблемы, связанные с исчерпанием природных ресурсов, изменением климата и др. Пути обновления содержания естественнонаучного образования обсуждаются в следующих направлениях:

Во-первых, обращается внимание на включение в содержание образования научных знаний, соответствующих современному уровню развития науки и необходимых для решения жизненно важных задач устойчивого развития, формирования естественнонаучной функциональной грамотности, соответствующей вызовам XXI в. По единодушному мнению членов Римского клуба, молодежь во всем мире продолжает «учиться по учебникам с идеями из 1950-х гг, основанных на теориях 1850-х гг» [4].

Во-вторых, речь идет о необходимости усиления мировоззренческой направленности естественнонаучного образования, о формировании образа мира через призму культуры: систему социокультурных ценностей, культурных универсалий, отражающих отношение человека к природе, к обществу, другим людям и самому себе, ценностно-смысловую оценку тех или иных его событий и явлений. Мировоззренческая направленность естественнонаучного образования неразрывно связывается с формируемой культурой устойчивого развития и гуманистическим характером решения глобальных проблемы на основе ценности сохранения на планете всех культур и народов [1].

В-третьих, усиление фундаментальности знаний, направленности естественнонаучного образования на формирование научной картины мира, как компонента современного мировоззрения. Научная картина мира – особый тип научного теоретического знания. Это специфическая форма систематизации научного знания, которая выделяет из бесконечного многообразия реального мира именно те его сущностные связи, познание которых и составляет основную цель науки на том или ином этапе ее исторического развития. Этот процесс направляется философией, которая помогает осмыслить новые результаты науки через категориальную матрицу, обеспечивающую исследование принципиально новых (по сравнению с уже познанными) объектов [5].

В-четвертых, синтез знаний. Учитывая междисциплинарный характер глобальных проблем, с которым столкнулось человечество, и полидисциплинарный характер концепции устойчивого развития, есть основания вести речь об объединении научных знаний в систему. К середине XX в. дисциплинарно организованная наука (благодаря усилению интегративных связей между ее ветвями) сформировала три основных подсистемы общей научной картины мира – представления о неживой природе, сфере жизни и обществе. Но связь между этими подсистемами еще не была органичной, она обеспечивалась больше философскими идеями о развитии мира. В XXI в., в условиях активно идущих процессов глобализации, изменяющих все сферы нашего бытия, нарастающих глобальных проблем, касающихся всех стран и жизни каждого человека, четко проявилась тенденция междисциплинарного синтеза знаний и понимание контрпродуктивности ограничения обучения лишь специальными научными картинами мира, необходимости выстроить взаимодействие предметных онтологий разных дисциплин. Специальные научные картины мира, связанные с усилением дифференциации науки, формируют относительно автономные объекты исследуемой реальности. Постепенно начинает утрачиваться целостное видение мира. Однако простое соединение специальных картин мира не создаст новой единой картины [5]. Чтобы увидеть большее, пренебрегая меньшим, – напутствовал Н. Н. Моисеев [6], – чтобы дух человека не потерялся в мелочах. Как отмечал Огюст Конт [7], необходимо разработать философские принципы формирования общенаучной картины мира. В условиях обострения экологических проблем, понимание которых базируется, прежде всего, на междисциплинарном естественнонаучном знании, становится актуальным формирование целостной естественнонаучной картины мира в ее экологическом аспекте.

### **Материалы и методы исследования**

Философская, научная и научно-педагогическая литература, документы ЮНЕСКО, «Основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года», документы ФГОС, Примерные основные образовательные программы – все эти материалы стали основой для изучения поставленной проблемы. Теоретические методы исследования: анализ, синтез, обобщение, аксиоматизация, абстрагирование.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

С середины прошлого столетия проблема интеграции знаний обрела новые смыслы в связи с появлением объединяющей все науки экологической проблематики, изучением разных сторон современного экологического кризиса, связанных с ним глобальных проблем и представлений об экологическом императиве. Экологический императив – ключевое понятие современной экологической культуры, образования для устойчивого развития, результат синтеза знаний разных учебных дисциплин, каждая из которых вносит свой вклад в формирование целостных представлений об объективных, допустимых природой, границах деятельности человека в окружающей социоприродной среде. Изучение физики, химии, биологии, физической географии дает возможность наполнить конкретным содержанием представления о системных запретах деятельности человека в окружающей среде, которые в условиях глобального мира действуют тотально, неотвратимо, проявляясь не только на глобальном, но и локальном и личностном уровнях. Содержание естественнонаучных дисциплин потенциально может предоставить доказательства того, что такие запреты носят не правовой и не этический, а объективный характер, с третьей позиций законов устойчивости экологических систем. Однако простое изучение глобальных проблем в разных естественнонаучных учебных предметах еще не позволяет раскрыть суть экологического императива. Просто рассказывая ребенку о многообразии жизненных форм, о том, как сложно устроен и красив наш мир, мы не продвинемся в обучении его экологии, не закрепим в его памяти так необходимые ему основы понимания мира, в котором ему предстоит жить [8].

Опираясь на онтологию и методологию естественнонаучного познания, общенаучные понятия и принципы науки, которые пронизывают ее фундамент, рассмотрим ключевые категории целостной естественнонаучной картины мира, позволяющие раскрыть сущность экологического императива как базовой идеи устойчивого развития.

**Понятие «природа» в естественнонаучной картине мира.** Естественные науки – это науки о природе. Рассматривая проблему синтеза и систематизации естественнонаучных знаний, важно уточнить значение понятия «природа», которое употребляется в учебных текстах в трех значениях: 1) как весь материальный мир Вселенной, мироздание, универсум, законы которого едины для всех его форм: живой и неживой природы, человека, его сообществ и техносферы; 2) как совокупность косной и живой природы, что автоматически удаляет из предмета изучения общество и техносферу; 3) как места вне городов, загородные угодья (поля, леса, горы). В целях конкретизации объема понятия «природа» в широком смысле выделяют «первую природу» – естественное геологическое окружение и мир живых организмов; вторую – преобразованное, окультуренное геологическое окружение, сорта культурных растений и породы животных, измененные под влиянием культуры человека; третью природу – искусственную среду как показатель следующей ступени преобразования природного мира в результате научно-технической революции (мир техники, ксенобиотики, искусственный интеллект и т. д.).

Естественные науки изучают природу, понимаемую в широком смысле как материальный мир Вселенной, и в узком – как изучение гео- и биосферы. К сожалению, в учебных курсах как общего, так и профессионального образования зачастую не уточняется, какое именно значение вкладывается в понятие «природа».

В начальной школе учащиеся знакомятся с понятием «природа» в узком смысле – как все то, что не создано руками человека. В младших классах и в последующем обучении мир людей изучается отдельно, рассматриваются его особенности, отличия от живой и неживой природы, а связи с природой выстраиваются, с одной стороны, с точки зрения удовлетворения потребностей человека, а с другой стороны, в аспекте этических и правовых норм, которые устанавливаются самими людьми.

Целостная естественнонаучная картина мира, о которой мы ведем речь, оперирует понятием «природа» в широком смысле, что отражается в ее ключевых категориях: материальное единство мира, объективность и познаваемость, развитие, многообразие, система, самоорганизация, детерминизм.

**Естественнонаучная картина мира о его материальном единстве.** В основе онтологии естественнонаучной картины мира – доказательства материальности мира как основания его единства, которые предоставляются физикой, химией, биологией и физической географией. Представления о материальном единстве мира лежат и в основе концепции устойчивого развития как новой парадигмы отношения человека к окружающей его среде и эволюции жизни во Вселенной.

Материальное (не зависящее от какого-либо духа или сознания) единство мира – единое всеобщее материальное начало, лежащее в основе всего многообразия вещей и явлений мира, которое раскрывается через фундаментальные законы сохранения (вещества, энергии, импульса); единство физических явлений (механических, тепловых, электромагнитных и квантовых) и химических реакций (соединение, окисление, замещение, распад, окисление-восстановление) во Вселенной; универсальных видов материи (вещество, энергия, информация) при всем многообразии ее форм.

Следствием закона сохранения, например, вещества является закон о неустранимости отходов. «Образующиеся в процессе производственной деятельности отходы неустранимы бесследно, они могут быть лишь переведены из одной формы в другую или перемещены в пространстве, а их действие может быть растянуто во времени» [9]. Материя не исчезает, а лишь переходит из одной формы в другую, оказывая влияние на условия жизни. Барри Коммонер сформулировал это так: «все должно куда-то деваться» [10].

На Земле количество живого вещества биосферы для данного геологического периода есть константа: «... Глобальная экосистема представляет собой единое целое, в рамках которого ничего не может быть выиграно или потеряно и которое не может являться объектом всеобщего улучшения; все, что было извлечено из нее человеческим трудом, должно быть возмещено. Платежа по этому векселю нельзя избежать; он может быть только отсрочен. Нынешний кризис окружающей среды говорит о том, что отсрочка очень затянулась» [10]. Как считал Н. Ф. Реймерс, к сожалению, подтверждается мысль о том, что «чем больше пустынь мы превратим в цветущие сады, тем более цветущих садов мы превратим в пустыни». «Ничто не дается даром», то есть любое новое приобретение в эволюции экосистемы обязательно сопровождается утратой какой-то части прежнего достояния и возникновением новых, все более сложных проблем. Не существует «бесплатных» для биосферы ресурсов – пространство, энергия, солнечный свет, вода, какими бы неисчерпаемыми они ни казались, неукоснительно оплачиваются любой расходуемой их системой [9]. Поэтому современные экологи вывели еще один закон экологии – «на всех не хватит» (закон ограниченности ресурсов). Масса питательных веществ для всех форм жизни на Земле конечна и ограничена. Значительное увеличение численности и массы каких-либо организмов в глобальном масштабе может происходить только за счет уменьшения численности и массы других. В XXI в. действие этого закона приобретает острые формы политических, экономических и даже военных конфликтов в борьбе за природные ресурсы. Однако в живой природе и в человеческом обществе закон ограниченности ресурсов действует по-разному. Теория Мальтуса, превратившаяся сегодня в неомальтузианство – политически

ангажированная под прикрытием экологических проблем идея передела жизненных ресурсов планеты – является неофашизмом, объявляющим избранными людей богатых стран и оправдывающим насильственные методы борьбы с остальным населением (теория «золотого миллиарда» сегодня уже сократила число людей, достойных комфортной жизни на планете, сначала до одного миллиона, потом до 100 тыс.) [4].

Альтернативу идее передела природных ресурсов представляет концепция устойчивого развития, разрабатываемая под эгидой ЮНЕСКО со второй половины XX в. Это концепция формирования культуры сознательного и ответственного управления отношениями природы – общества – экономики при ведущей роли образования в этом процессе. В. И. Вернадский писал о знании, как геологической силе, способной обеспечить сохранение равновесия между антропогенным давлением на среду и восстановлением этой среды. Он обращал внимание на роль образования в преобразовании человеческих потребностей: осознанном отказе от необузданного потребительства и развитии потребностей духовного плана. В основе созданной им теории ноосферы – выполнение человеком своей биосферной функции в неизбежной трансформации биосферы под влиянием мысли и человеческого труда в ноосферу – геосферу, в которой разум становится доминирующим в развитии системы «человек – природа» [11], при этом именно образование призвано сыграть в этом решающую роль.

**Идея развития в естественнонаучной картине мира.** Принципами, которые позволили бы объединить различные видения природы, представленные в содержании разных естественнонаучных дисциплин, могли бы быть рационально осмысленные принципы развития и необратимости эволюции.

Систему взглядов В. И. Вернадского о биосфере называют учением об эволюции биосферы и ноосферы. Его, несомненно, следует рассматривать в качестве одной из существенных составляющих естественнонаучной картины мира. Биосфера, по мнению ученого, является результатом «достаточно длительной эволюции во взаимосвязи с неорганическими условиями» и может быть рассмотрена как закономерный этап развития материи. Она предстает в качестве особого геологического тела, структура и функции которого определяются специфическими особенностями Земли и космоса» [11].

В своем учении универсального эволюционизма Н. Н. Моисеев связал между собой развитие Космоса (космогенеза), планеты Земля (геогенеза), живой оболочки на ней (биогенеза), появление человека и развитие общества (социогенеза) как закономерные этапы эволюции Универсума, мироздания. Согласно закону необратимости эволюции, или однонаправленности развития, мегасистемы эволюционируют только в одном направлении – от простого к сложному. Не случайно в 1972 г. Организацией Объединенных Наций была принята Конвенция о сохранении культурного и природного наследия, а образование для устойчивого развития во многих странах мира иначе называется образованием в области культурного и природного наследия каждого человека, которое мы получили от предков и должны передать потомкам, имеющим такие, как и мы, права на благополучную окружающую среду. Утрата как природного, так и культурного наследия безвозвратна, невосполнима и трагична для судьбы цивилизации. Закон необратимости эволюции гласит: организм (популяция, вид) не может вернуться к прежнему состоянию, осуществленному в ряду его предков. Все существующее сегодня на планете – от простых молекул до человека и его культуры – является результатом эволюции жизни в течение десятков и сотен миллионов лет, в ходе которых историческое развитие живых организмов приводило к усложнению их организации путем дифференциации органов и функций (закон усложнения организации). Населяющие сегодня планету виды растений и животных составляют всего лишь 1/1000 всех видов, которые прошли естественный отбор и смогли включиться в глобальный биотический круговорот. Биологические виды, которые не смогли вписаться, вымирали. Ход эволюции необратим. Утрата биологического разнообразия – основного фактора устойчивости природных экосистем необратима и не может быть компенсирована развитием современных технологий.

Изучение биологии доказывает существование цикличности изменений в биосфере, в частности, периодичности ее катастроф, которые носили природный, абиотический или биотический характер. Известно пять массовых вымираний биологических видов, например, вымирание до 80 % биологических видов в пермский период, которые кардинально меняли условия жизни на планете, состав газов в атмосфере, круговороты веществ. В отличие от катастроф, экологические кризисы (когда среда обитания одного из видов или популяции изменяется так, что ставит под сомнение его дальнейшее существование, но при этом экологическая система способна к восстановлению) встречались в истории современной цивилизации. Они носили природный или антропогенный характер. Современный экологический кризис связан с антропогенной нехваткой редуцентов, накоплением ксенобиотиков; термодинамическим кризисом; деградацией земель; глобальными изменениями климата; загрязнением воздуха и мирового океана; истощением озонового слоя; нехваткой пресной воды; снижением биологического разнообразия; снижением адаптационных и защитно-компенсаторных механизмов человеческого организма; ростом в биосфере концентрации углекислого газа (в 2 раза за 800 лет и т. д.). Еще одна особенность современного экологического кризиса – опасность его превращения в глобальный, что приведет к экологической катастрофе, к потере окружающей средой качеств, к которым адаптировался человек в ходе своей эволюции. Проблема заклю-

чается и с тем, что современный экологический кризис происходит на фоне действия правила ускорения эволюции: с ростом сложности организации биосистем продолжительность существования вида в среднем сокращается, а темпы эволюции возрастают. Поэтому, сколько времени биосфера сможет выдерживать все возрастающую антропогенную – неизвестно. Цели устойчивого развития, принятые практически всеми странами мира к реализации, ставят задачу затормозить негативные процессы в биосфере, подготовить так называемую «экологическую революцию» – изменение типа хозяйствования на планете.

**Естественнонаучная картина мира о системной организации материи.** В основе современных научных представлений о единстве строения материи лежит идея о ее системной организации. Практически все объекты, которые современная наука включает в сферу своего исследования, носят системный характер. Среди совокупности общенаучных понятий особый статус в XX в. приобрели понятия, характеризующие различные типы системной организации объектов, общие принципы их взаимодействия, функционирования и развития. Естественнонаучные предметы изучают все типы систем: закрытые, замкнутые и открытые. Система – это совокупность элементов или отношений, закономерно связанных друг с другом в единое целое, которое обладает свойствами, отсутствующими у элементов или отношений их образующих. Система есть объект, целостность которого обеспечивается совокупностью связей и отношений между группами элементов, объединенных развернутыми в пространстве и во времени структурами [12]. Сложные системы (например, экологические) состоят из подсистем – вложенных и пересекающихся, содержащих общие элементы, относящихся к нескольким подсистемам сразу, которые выполняют в подсистемах функции, обеспечивающие реализацию целевой функции всей системы в целом. Вложенные и пересекающиеся системы невозможно разделить так, чтобы не нарушилась целостность хотя бы одной из них.

Системы классифицируются на замкнутые, которые, как и управление этой системой, не испытывают влияния внешней среды через обмен вещества и энергии; закрытые – обменивающиеся с окружающей средой энергией, но не веществом; системы открытые, связанные с окружающей средой обменом веществ и энергии. Открытые системы (природные, социоприродные, социальные) могут развиваться только за счет окружающей среды, использования ее материально-энергетических и информационных возможностей. Согласно закону оптимальности, наибольшую эффективность функционирования система достигает в некоторых характерных для нее пространственно-временных пределах (то есть, никакая система не может сужаться или расширяться до бесконечности). Размер системы должен соответствовать выполняемым ею функциям. Действует принцип минимального размера популяций: существует минимальный размер популяции, ниже которого ее численность не может опускаться [9].

В ходе изучения сложных открытых систем создаются основания к взаимодействию дисциплинарных онтологий физики, химии, наук о жизни, географии, космологии и появлению пограничных наук – биохимия, биофизика, медицинская география и др. Общие закономерности взаимосвязи «система – среда» обобщены в философски расширенной формулировке принципа дополнительности Нильса Бора. Жесткие системы (механические устройства и тоталитарно-автократические общественные структуры) лишены механизмов самоподдержания и потому обречены на постепенное разрушение, тем более скорое, чем агрессивнее для них окружающая среда.

Согласно Я. Пригожину, в открытых системах энтропия не возрастает, а уменьшается до тех пор, пока не достигается минимальная постоянная величина, всегда больше нуля (принцип сохранения упорядоченности). Таким образом, деятельность живых систем (организмов, их сообществ) неэнтروпийна, совершается работа по увеличению степени их структурированности. Для живых систем, согласно Л. Онсагеру, при вероятности развития процесса в некотором множестве направлений, допускаемых началами термодинамики, реализуется то, которое обеспечивает минимум рассеивания энергии (принцип экономии энергии). При этом оптимальная эффективность всегда меньше максимальной, то есть высокая продуктивность дает низкую надежность (устойчивость). Это важно понимать при создании агроценозов. Отсюда и закон максимизации энергии и информации: наилучшими шансами на самосохранение обладает система, в наибольшей степени способствующая поступлению, выработке и эффективному использованию энергии и информации; максимальное поступление вещества не гарантирует системе успеха в конкурентной борьбе [9]. Н. Н. Моисеев обозначает его как принцип экономии энтропии, дающей «преимущество» сложным системам перед простыми. Этот принцип звучит так: если в данных условиях возможны несколько типов организации материи, не противоречащих законам сохранения и другим принципам, то реализуется и сохранит наибольшие шансы на стабильность и последующее развитие именно тот, который позволяет утилизировать внешнюю энергию в наибольших масштабах, наиболее эффективно [13]. Все эти характеристики крайне важны для организации рационального природопользования и прогноза изменений экологических систем и биосферы, в целом, при изменении показателей их внутренней и внешней среды.

**Проблема самоорганизации систем в естественнонаучной картине мира.** Довольно длительное время самоорганизация соотносилась только с живыми системами, что же касается объектов неживой

природы, считалось: если они и эволюционируют, то лишь в сторону хаоса и беспорядка, соответствующим вторым началам термодинамики. Сегодня представления об открытых самоорганизующихся системах находят подкрепление в самых различных областях знания, стимулируя в них разработку эволюционных идей [5].

Способность биосферы как сложной саморегулируемой и самоорганизующейся экологической мегасистемы непрерывно поддерживать на планете определенный круговорот веществ, сохранять в основных чертах свою структуру, характер связей и функций элементов, то есть поддерживать гомеостаз, является условием сохранения качества окружающей природной среды, необходимого для жизни человека. Гомеостаз – свойство высокоорганизованных самоорганизующихся систем поддерживать основные функции, параметры и тренды развития. Природные экологические системы способны к саморегуляции и самовосстановлению при условии незначительного изменения среды их обитания. Пока изменения среды слабы и произведены на небольшой площади, они ограничиваются конкретным локальным пространством или «гасятся» в цепи иерархии экосистем на уровне естественных круговоротов вещества и энергии на Земле. Саморегуляция экологической системы – ее способность сохранять постоянными биологическое разнообразие (состав биоты), биологическую продукцию и круговороты элементов питания [9].

Жизнь на Земле имеет экосистемную форму организации, поэтому исключительную важность для ее понимания играет учение универсального эволюционизма Н. Н. Моисеева, в котором в единое целое объединяются идеи теории самоорганизующихся систем разной степени сложности и эволюционного подхода. Доказано, что в открытых системах, находящихся в неравновесном состоянии, возникают и формируются новые структуры за счет внутренних кооперативных процессов, под влиянием различного рода флуктуаций, благодаря чему осуществляется переход от одного типа самоорганизующейся системы к другой, а эволюция систем в конечном счете приобретает направленный характер. Саморазвивающиеся объекты характеризуются иерархией уровней и появлением по мере развития все новых уровней, которые воздействуют на ранее сложившиеся и видоизменяют их. Примером самоорганизующейся мегасистемы является биосфера, способная адаптироваться к широкому спектру условий [13]. Исключения составляют астрофизические катаклизмы, способные создать на планете, режим, несовместимый с любой формой земной жизни, например, температурный. К сожалению, в учебных текстах до настоящего времени можно встретить неадекватные представления о возможностях экосистем к самоорганизации: «Природа – это некий хрупкий, легко разрушающийся организм, и человек способен нанести ей непоправимый вред: одним неловким движением разбить, разрушить, как хрустальную вазу» [14]. Нередко употребляется словосочетание «природа погибнет». На самом деле, силы природы, доказывает В. И. Вернадский, настолько огромны, что деятельность человека несопоставима с ними. Часто неверно истолковывают его фразу о том, что «Человек становится геологической силой, способной изменить лик Земли», вкладывая в нее не тот смысл, который делал этот великий ученый и мыслитель. Он отмечал: «Основной геологической силой, создающей ноосферу, является рост научного знания» [11]. В условиях ноосферы человек сможет стать геологической силой. Он познает с помощью науки силы природы и направит их на сохранение устойчивости биосферы. Именно наука, знания могут сделать так, что воздействие на природу будет природосообразным, человечество станет частью биосферы, включится в ее естественный большой геологический круговорот без его нарушения. В противном случае изменение качества окружающей человека природной среды, ее физико-химического состава в условиях стремительного роста техносферы может стать несовместимым с условиями жизни людей, и природа продолжит эволюционировать без них.

**Естественнонаучная картина мира о многообразии и разнообразии природы.** Знания, получаемые из физики, химии, биологии, свидетельствуют о многообразии свойств окружающей среды (цвета, звуков, движений, форм, химического состава и т. д.), а также всевозможных приспособлений к ним живых существ и их сообществ. Формируются знания о природном разнообразии: ландшафтном, биологическом, генетическом. Они важны для понимания системного закона необходимого разнообразия Эшби. Согласно этому закону, система, чтобы отвечать задачам управления и быть эффективной, должна обладать возможностью изменять свое состояние в ответ на предполагаемое возмущение. Многообразие возмущений требует соответствующего ему многообразия возможных состояний живых систем и их разнообразия в сообществах. Отсутствие или недостаточность многообразия, ответных реакций или природного разнообразия (ландшафтного, биологического или генетического) может свидетельствовать о нарушении целостности подсистем, составляющих данную систему. Закон необходимого разнообразия объясняется, в частности, неравномерностью развития частей системы: системы одного уровня иерархии развиваются не строго синхронно, в то время как одни достигают более высокой стадии развития, другие остаются в менее развитом состоянии.

Одна из наиболее острых проблем современного экологического кризиса в XXI в. – нарастающий дефицит не столько полезных ископаемых на Земле, сколько способности живых организмов, в том числе

человека, их сообществ приспособляться к очень быстро изменяющейся окружающей среде, что способствует сокращению естественного многообразия окружающего мира и появление новых факторов, ранее не свойственных биосфере. Это приводит к превышению пределов, границ выносливости ряда биологических видов и устойчивости экологических систем, угрожает снижением биоразнообразия на планете, *создает риски для замкнутости круговорота в глобальном масштабе. Такие риски возрастают в условиях ускорения эволюции с ростом сложности организации систем, проявляющейся в органическом мире, человеческой истории, в развитии техники.*

Изучение физики, химии, систематики растений и животных дает богатый материал для понимания значения многообразия окружающего мира и природного разнообразия для сохранения экологической ниши человеческого вида и устойчивого развития общества. Уникальную ценность для всего мира имеет природное богатство России. Благодаря сохранению территорий естественных экологических систем, дикая природа России обеспечивает 10 % устойчивости биосферы. По запасам пресной воды, количеству биоразнообразия, территорий болот и лесов Россия является самым крупным экологическим донором на планете. Действия стран мира по пути сохранения природного разнообразия на планете нашли отражение в Целях устойчивого развития до 2030 г.

**Детерминизм в естественнонаучной картине мира.** Детерминизм – общенаучное понятие и философское учение о причинности, закономерности, генетической связи, взаимодействии и обусловленности всех явлений и процессов, происходящих в мире, результат обобщения конкретно-исторических и конкретно-научных концепций. Исходной предпосылкой принципа детерминизма является существование всеобщей универсальной взаимосвязи всех явлений.

Биологические процессы не противоречат законам химии и физики, а химические процессы не перечеркивают законы физики. Свойства химических элементов, определяемые их положением в таблице Менделеева, предполагают особенности их физических и химических свойств, а также роль в физиологии органов и тканей живых организмов, в биогенной миграции атомов в биосфере.

Становление целостной естественнонаучной картины мира создает предпосылки формирования картины социального развития, которое детерминируется экологическими условиями поддержания жизни человека. По мнению известного специалиста в области метагеографии Д. Н. Замятина, «...отсутствие разработанных механизмов взаимодействия с традиционными естественными науками, расслоение, прежде всего, достаточно единого массива гуманитарных знаний на большое количество обособленных и слабо связанных когнитивных областей... является одним из «самых мощных» препятствий (и) для гуманитарных наук [15].

Абсолютизации социологических схем развития общества, которые игнорируют, а то и исключают в судьбах народов и культур природно-географические и демографические факторы, упрощенно толкуют экономическое учение Маркса о классовой борьбе и сменах экономических формаций, противостоит географический детерминизм, раскритикованный в свое время, что затормозило развитие теории детерминаций развития общества [16].

Совокупность формируемых на естественнонаучных дисциплинах представлений о единстве материального мира, его познаваемости, объективности научного знания, развитии мира и необратимости эволюции, единстве строения материи, системности, самоорганизации, многообразии, детерминации являются ключевыми для раскрытия сущности понятия экологического императива – базового в концепции устойчивого развития.

**Роль естественнонаучной картины мира в формировании представлений об экологическом императиве – базовом понятии устойчивого развития.** Понятие экологического императива было введено Н. Н. Моисеевым в 80-х гг. XX в. как границы допустимой активности человека, которую он не имеет права переступать ни при каких обстоятельствах. Ученый отмечал: «Экологический императив – это некоторое множество свойств окружающей среды, зависящих от особенностей цивилизации, изменение которых человеческой деятельностью недопустимо ни при каких обстоятельствах» [13]. Проводя границу с экологическим императивом Канта, Н. Н. Моисеев подчеркивал объективный характер ограничения деятельности человека в окружающей среде со стороны природы. Экологический императив не зависит от воли человека, но следование ему – вопрос знаний, умений и ценностей человека. Людям необходимо знать пределы вмешательства в природу, допустимые уровни нагрузки на биосферу, уровни мутагенеза и др., то есть границы своей деятельности в общепланетарном масштабе.

Экологический императив исходит из существования границ колебания незаменимых для жизни факторов окружающей среды, которые определяются лимитом выносливости организма или пределами устойчивости экологических систем. За этими границами в живых системах наступают необратимые процессы, приводящие к их гибели или деградации, что накладывает объективные ограничения на деятельность человека в окружающей среде, ставит проблему меры ее преобразования. Действие экологического императива относится к сложным открытым системам, поведение которых сложно наблюдать в жизни в силу

больших пространственно-временных масштабов происходящих в них изменений. Для лучшей наглядности могут быть полезными аналогии детерминации на уровне физических, химических и биологических процессов.

Так, из физики известно, что устойчивость системы любой природы, сохранение ее характеристик имеет пределы. В физике первый закон Ньютона постулирует наличие такого явления, как инерция тел – явление сохранения телом скорости движения (по величине и направлению), когда на тело не действуют никакие другие силы. Инертность – свойство тел сопротивляться изменению их текущего состояния. Второй закон Ньютона определяет как взаимодействие системы со средой (инертность) зависит от внутренних свойств системы (массы тела). Третий закон устанавливает, что силы всегда возникают парами (действие и противодействие), хотя они могут не уравниваться. Для описания результатов их действия и противодействия используются такие характеристики, как хрупкость и пластичность. Как метафоры они используются и для описания состояния экологических систем под влиянием внешних воздействий.

Наглядный образ экологического императива может быть представлен с помощью физического опыта «бочка Либиха»: вода, налитая в бочку, в стенках которой на разном уровне сделаны отверстия, выливается, достигая самого нижнего отверстия, высота его расположения является лимитирующей, ограничивающей возможность наполнения бочки водой. Очевидно, что это ограничение носит объективный характер.

Параллель с действием экологического императива можно провести и с помощью химии, используя принцип Ле-Шателье-Брауна. Согласно ему, если на систему, находящуюся в состоянии химического равновесия, оказано внешнее воздействие (температура, давление, концентрация, внешнее электромагнитное поле), то равновесие сместится в направлении той реакции, которая ослабляет это воздействие. Ле-Шателье сформулировал эту закономерность как термодинамический принцип подвижного равновесия, который применим к равновесию любой природы: механическому, тепловому, химическому, электрическому.

Несмотря на сходство, закономерности, имеющие место для разных форм движения материи, не тождественны. Прямой перенос, прямые аналогии закономерностей физической, химической, биологической и социальной форм движения материи недопустимы: каждая из них имеет свою специфику [9].

В биологии, имеющей дело с открытыми самоорганизующимися системами, действует закон внутреннего динамического равновесия Н. Ф. Реймерса. Согласно этому закону, вещества, энергия, информация и динамические качества отдельных природных (экологических) систем и их иерархии взаимосвязаны настолько, что любое изменение одного из этих показателей вызывает сопутствующие функционально-структурные количественные перемены, сохраняющие общую сумму вещественно-энергетических, информационных и динамических качеств экосистем, где эти изменения происходят, или в их иерархии [9].

Следствием закона являются:

- закон оптимальности – любая система функционирует с наибольшей эффективностью в некоторых характерных для нее пределах колебания параметров окружающей среды;
- закон минимума Либиха – успешную жизнедеятельность организма ограничивает экологический фактор, количество и качество которого близок к минимуму, необходимому организму;
- представление о базовых незаменимых факторах окружающей среды, которые невозможно заменить другими.

Факторы, сдерживающие развитие организмов и их сообществ из-за недостатка или их избытка по сравнению с потребностями, называются лимитирующими. Закон внутреннего динамического равновесия и его следствия являются фундаментальной основой для организации природопользования и разработки природоохранной политики в народном хозяйстве. Они дают возможность ставить в экологии вопрос о выносливости биологических видов и устойчивости природных экосистем, включая самую большую природную экосистему – биосферу. Пределами выносливости называют минимальное и максимальное значения факторов (физического, химического, информационного), при которых возможна жизнедеятельность. Границы, за пределами которых наступает гибель организмов, являются нижними и верхними границами выносливости вида. Их называют критическими точками. Расчеты ученых позволяют приблизительно определить порог устойчивости (допустимого возмущения) биосферы: биота сохраняет способность контролировать условия окружающей среды, если человек в ходе своей деятельности использует не более 1 % ее чистой первичной продукции. Остальная часть продукции должна перераспределиться между видами, выполняющими функции стабилизации окружающей среды. Отсюда правило одного процента: изменение энергетики природной среды в среднем на 1 % выводит последнюю из состояния равновесия. Все крупные природные явления на Земле (извержения вулканов, мощные циклоны и т. п.), как правило, имеют суммарную энергию, не превышающую 1 % энергии солнечного излучения, падающего на ее поверхность. Однако в XXI в., согласно расчетам, порог допустимого воздействия на биосферу уже превышен, и для предотвращения глобальных изменений в составе окружающей среды (прежде всего, в количестве углекислого газа в атмосфере) необходимо сократить площадь нарушенных земель с 61 до 38 %.

## Заключение

Поиск интегральной парадигмы, объясняющей и прогнозирующей взаимоотношения общества и природы в XXI в., может опираться лишь на синтез гуманитарного знания с естественнонаучным в самом широком его диапазоне: на представления о природе как материальном мире Вселенной, Универсуме, законам которого подчиняется все сущее; об общей судьбе человека с биосферой; о том, что обществу необходимо научиться управлять собой и организовывать свою жизнедеятельность в пределах, детерминированных экологическим императивом.

Как предотвратить катастрофическое изменение биосферного уровня организации жизни, необратимое нарушение глобального биогеохимического круговорота веществ, когда биосфера достигает точки невозврата в прежнее состояние, какой должна стать во всех сферах жизни общества революция экологического управления? Ответы на многие эти вопросы могут находиться в естественнонаучной картине мира, осмысленной на основе ценностей био- и экологической этики; природного и культурного разнообразия, мира и ненасилия, устойчивого развития [16; 17].

Академик Н. Н. Моисеев отмечал: «Человечество подошло к порогу, за которым нужны и новая нравственность, и новые знания, новый менталитет, новая система ценностей. Необходимо избрать иную, духовно-экологическую, стратегию развития; в противном случае человечество может быть сметено с Земли в результате глобальных кризисов» [6].

## Библиографические ссылки

1. Резолюция A/RES/70/1 Генеральной Ассамблеи ООН от 25 сентября 2015 года «Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» [Интернет]. [Процитировано 2 декабря 2020 г.]. Доступно по: [https://unctad.org/system/files/official-document/ares\\_70d1\\_ru.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/ares_70d1_ru.pdf).
2. Guterres A. Remarks to the General Assembly on the Secretary General's priorities for 2020. [Internet]. [Cited 2020 April 18]. Available from: <https://www.un.org/sg/en/content/sg/speeches/2020-01-22/remarks-general-assembly-priorities-for-2020>.
3. Берлинская декларация об образовании в интересах устойчивого развития, принятая на Всемирной конференции ЮНЕСКО по образованию для устойчивого развития [Интернет]. 2021. Доступно по: <https://en.unesco.org/sites/default/files/esdfor2030-berlin-declaration-ru.pdf>
4. Von Weizsaecker T, Wijkman A. Come On! Capitalism, Short-termism, Population and the Destruction of the Planet. New York: Springer; 2018.
5. Степин ВС, Кузнецова ЛФ. *Научная картина мира в культуре техногенной цивилизации*. Москва: ИФ РАН; 1994. 274 с.
6. Моисеев НН. *Универсум. Информация. Общество*. Москва: Устойчивый мир; 2001. 200 с.
7. Конт О. Курс положительной философии. *Философия и общество*. 1999;1:12–24.
8. Ермаков ЛН. *Экология*. Томск [б. н.]; 2007. 170 с.
9. Реймерс НФ. *Экология*. Москва: Журнал Россия Молодая; 1994. 367 с.
10. Коммонер Б. *Замыкающийся круг*. Москва: Гидрометиздат; 1974. 280 с.
11. Вернадский ВИ. *Биосфера и ноосфера*. Москва: Айрис-Пресс; 2013. 573 с.
12. Блауберг ИВ, Садовский ВН, Юдин ЭГ. Системный подход: предпосылки, проблемы, трудности. Москва: Знание; 1969. 48 с.
13. Моисеев НН. *Современный антропогенез и цивилизационные разломы. Экологополитологический анализ*. Москва: [б. н.]; 1994. с. 46
14. Дзятковская ЕН, Трубицына ЛВ, редакторы. *Образование для устойчивого развития во внеурочной деятельности*. Москва: Издательство Академии им. Н. Е. Жуковского; 2014. 88 с.
15. Замятин ДН. *Метагеография: Пространство образов и образы пространства*. Москва: Аграф; 2004. 512 с.
16. Мягков ГП, Недашковская НИ. От географического детерминизма к экологической истории: гуманитарии в преддверии нового «поворота». В: *Проблемы просвещения, истории и культуры сквозь призму этнического многообразия России*. Чебоксары: Издательство «Среда»; 2018. с. 436–444.
17. Global Challenges Foundation. Global Catastrophic Risks and International Collaboration. Opinion poll 2020. Report [Internet]. [Cited 2020 November 18]. Available from: [C:/user/Desktop/GCF\\_Global\\_Challenges.2020-High.pdf](C:/user/Desktop/GCF_Global_Challenges.2020-High.pdf).
18. *Биоэтика и биотехнологии: пределы улучшения человека*. Москва: Издательство Московского гуманитарного университета; 2017. 240 с.

## References

1. UN General Assembly Resolution A/RES/70/1 of September 25, 2015, The 2030 Agenda for Sustainable Development. [Internet]. [Cited 2020 December 2]. Available from: [https://unctad.org/system/files/official-document/ares\\_70d1\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/ares_70d1_en.pdf).
2. Guterres A. Remarks to the General Assembly on the Secretary General's priorities for 2020 [Internet]. [Cited 2020 April 18]. Available from: <https://www.un.org/sg/en/content/sg/speeches/2020-01-22/remarks-general-assembly-priorities-for-2020>.
3. Berlin Declaration on Education for Sustainable Development, adopted at the UNESCO World Conference on Education for Sustainable Development [Internet]. May 2021. Available from: <https://en.unesco.org/sites/default/files/esdfor2030-berlin-declaration-ru.pdf>.
4. Von Weizsaecker T, Wijkman A. Come On! Capitalism, Short-termism, Population and the Destruction of the Planet. New York: Springer; 2018.
5. Stepin VS, Kuznetsova LF. *Nauchnaja kartina mira v kulture tehnoemnoj tsivilizatsii* [The scientific picture of the world in the culture of a technogenic civilization]. Moscow: IF RAN; 1994. 274 p. Russian.

6. Moiseev NN. *Universum. Informatsiya. Obshchestvo* [Universe. Information. Society]. Moscow: Sustainable World; 2001. 200 p. Russian.
7. Cont OA. *Kurs položitelnoy filosofii* [Course in Positive Philosophy]. *Philosophy and Society*. 1999;1:12–24. Russian.
8. Erdakov LN. *Ecologiya* [Ecology]. Tomsk: [publisher unknown]; 2007. 170 p. Russian.
9. Reimers NF. *Ecologiya* [Ecology]. Moscow: Zhurnal Rossiya Molodaya; 1994. 367 p. Russian.
10. Kommoner B. *Zamykayushchijsa krug* [Closing Circle]. Moscow: Hydrometeorological Institute; 1974. 280 p. Russian.
11. Vernadsky VI. *Biosfera i noosfera* [Biosphere and Noosphere]. Moscow: Iris-Press; 2013. 573 p. Russian.
12. Blauberg IV, Sadovsky VN, Yudin EG. *Sistemnyj podhod: predposylki. Problem, trudnosti* [Systemic approach: prerequisites, problems, difficulties]. Moscow: Znanie; 1969. 48 p. Russian.
13. Moiseev NN. *Sovremennyy antropogenez I tsivilizatsionnye razlomy. Ekologopolitologicheskiy analiz* [Modern Anthropogenesis and Civilization Fractures. Ecological and Political Analysis]. Moscow: [publisher unknown]; 1994. p. 46. Russian.
14. Dzyatkovskaya EN, Trubitsyna LV, editors. *Obrazovaniye dla ustoychivogo razvitiya vo vneurochnoy deyatel'nosti* [Education for Sustainable Development in extracurricular activities]. Moscow: Publishing house of the Academy named after NE. Zhukovsky; 2014. 88 p. Russian.
15. Zamyatin DN. *Metageografiya: Prostranstvo obrazov i obrazy prostranstva* [Metageography: Image Space and Image Space]. Moscow: Agraf; 2004. 512 p. Russian.
16. Myagkov GP, Nedashkovskaya NI. *Ot geograficheskogo determinizma k ekologicheskoy istorii: gumanitarii v preddveri novogo «povorota»* [From geographical determinism to ecological history: humanities on the threshold of a new “turn”]. In: *Problems of Education, History and Culture through the prism of ethnic diversity in Russia*. Cheboksary: Publishing house «Sreda»; 2018. p. 436–444. Russian.
17. Global Challenges Foundation. *Global Catastrophic Risks and International Collaboration. Opinion poll 2020. Report* [Internet]. [Cited 2020 November 18]. Available from: C:/user/Desktop/GCF\_Global\_Challenges.2020-High.pdf.
18. *Bioetika i biotekhnologii: predely uluchsheniya cheloveka* [Bioethics and biotechnology: the limits of human improvement]. Moscow: Publishing house of the Moscow Humanitarian University; 2017. 240 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 25.05.2021.  
Received by editorial board 25.05.2021.

# ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

## THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 632.772(476)

### ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ЛИЧИНКАМИ КИЗИЛОВОЙ МИНИРУЮЩЕЙ МУХИ (*PHYTOMYZA AGROMYZINA* MEIGEN, 1830) СВИДИН И ДЕРЕНОВ В ГОРОДСКИХ ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЯХ

М. В. ЛАЗАРЕНКО<sup>1)</sup>, С. В. БУГА<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

По данным исследований 2017–2020 гг., проведенных в зеленых насаждениях городов Беларуси, оценена повреждаемость интродуцированного дерена белого (*Cornus alba* L.) и аборигенной свидины кроваво-красной (*Cornus sanguinea* (L.) Oriz) личинками кизиловой минирующей мухи (*Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830) на основе определения относительной площади поврежденной листовой поверхности. Значения данного параметра для отдельных листовых пластинок изменялись в диапазоне от 0,86 до 63,58 %, при этом средние значения для разных выборок не превышали 24,47 %. Суммарная площадь мин личинок *Ph. agromyzina* на отдельных листовых пластинках *Cornus* находилась в диапазоне от 0,23 до 3,65 см<sup>2</sup>. С использованием непараметрических критериев Манна–Уитни и Колмогорова–Смирнова были изучены различия медиан выборок и интегральные различия между выборками. Эти сведения

#### Образец цитирования:

Лазаренко МВ, Буга СВ. Повреждаемость личинками кизиловой минирующей мухи (*Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830) свидин и деренов в городских зеленых насаждениях. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;2:15–20.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-15-20>

#### For citation:

Lazarenko MV, Buga SV. Damage caused by larvae of mining fly (*Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830) to dogwoods in urban green spaces. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;2:15–20. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-15-20>

#### Авторы:

**Марина Владимировна Лазаренко** – аспирантка кафедры зоологии биологического факультета.  
**Сергей Владимирович Буга** – доктор биологических наук, профессор; заведующий кафедрой зоологии биологического факультета.

#### Authors:

**Marina V. Lazarenko**, postgraduate student at the department of zoology, faculty of biology.  
[marinavolosach@yahoo.com](mailto:marinavolosach@yahoo.com)  
**Sergey V. Buga**, doctor of science (biology), full professor; head of the department of zoology, faculty of biology.  
[sergey.buga@gmail.com](mailto:sergey.buga@gmail.com)

не были статистически достоверными при сопоставлении выводов для Минска и Витебска, а также данных разных лет как для *C. alba*, так и *C. sanguinea*. Однако по показателю относительной площади поврежденной поверхности между выборками обоих видов *Cornus* различия были статистически достоверны ( $p < 0,05$ ).

**Ключевые слова:** декоративные кустарники; интродуценты; минеры; филлобионты; Agromyzidae.

## DAMAGE CAUSED BY LARVAE OF MINING FLY (*PHYTOMYZA AGROMYZINA* MEIGEN, 1830) TO DOGWOODS IN URBAN GREEN SPACES

M. V. LAZARENKO<sup>a</sup>, S. V. BUGA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University,  
4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus  
Corresponding author:

According to the results of the investigations, carried out in 2017–2020 in the green spaces of cities in Belarus, the damage caused by larvae of *Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830 to Siberian dogwood (*Cornus alba* L.) and blood twig dogwood (*Cornus sanguinea* (L.) Opiz), based on determining the relative area of damaged leaf surface, was assessed. The values of this parameter for individual leaf blades varied in the range from 0.86 to 63.58 %, while the average for the samples did not exceed 24.47 %.

The total area of *Ph. agromyzina* mines on individual *Cornus* leaf blades ranged from 0.23 to 3.65 cm<sup>2</sup>. Using the nonparametric Mann–Whitney and Kolmogorov–Smirnov tests, the differences in medians and the integral differences between the samples were estimated. These values were not statistically significant when comparing data for Minsk and Vitebsk, and different years for both *C. alba* and *C. sanguinea*. However, in the values of the relative area of the damaged surface between the samples of both *Cornus* species the differences were statistically significant ( $p < 0.05$ ).

**Keywords:** ornamental shrubs; introduced plants; miners; phyllobionts; Agromyzidae.

### Введение

Минирующие мухи (Agromyzidae) – семейство круглошовных двукрылых насекомых (Insecta: Diptera, Cyclorrhapha), объединяющее более 1200 видов мировой фауны [1]. Таксон остается в Беларуси недостаточно изученным как в аспекте фаунистики, так и особенностей распространения, биологии и экологии даже массовых и (или) хозяйственно значимых видов [2]. На личиночной стадии представители семейства в большинстве своем являются минерами-филлобионтами, обитая в камерах в листовой паренхиме. Повреждение минерами ведет к сокращению площади ассимилирующей поверхности, деформации и некрозу листовых пластинок, ослаблению поврежденных растений, ухудшению эстетических качеств декоративных посадок, снижению продуктивности сельскохозяйственных культур. Имаго агромизид выступают векторами вирусных, бактериальных и других заболеваний культивируемых растений (заражение происходит при прокалывании самками яйцекладом тканей листа) [3]. Декоративным деревьям и кустарникам в зеленых насаждениях Беларуси вредит 13 видов минирующих мух, особенности распространения, биологии, экологии, а также многих из них недостаточной изученностью [4].

Свидины и дерены (*Cornus* spp.) – представители семейства кизиловых (Cornaceae) порядка кизилоцветных (Cornaceae), которые в настоящее время широко представлены в декоративных посадках городов Беларуси. В мировой флоре насчитывается около 50 видов рода *Cornus* L. [5], в Беларуси обитает единственный аборигенный вид – свидина кроваво-красная (*Cornus sanguinea* (L.) Opiz) [6]. В послевоенный период в создаваемые зеленые насаждения активно вводился, поэтому в настоящее время повсеместно обычен дерен белый (*Cornus alba* L.). В последние годы в озеленении шире используются его декоративные формы (дерен белый пестролистный (*C. alba* 'Argenteomarginata') и др. Дерен мужской, или кизил принадлежит к числу новых и перспективных для садоводства плодово-ягодных культур [7]. Для использования в зеленом строительстве Беларуси рекомендованы, помимо вышеперечисленных кустарников, дерен Бейли (*Cornus baileyi* Goultet Evans), дерен кистеобразный, или метельчатый (*Cornus racemosa* Lam.), а также дерен отпрысковый, или укореняющийся (*Cornus stolonifera* Michx.) [8].

Высокая декоративность свидин и деренов в летний период во многом определяется эстетическими качествами листвы. Повреждения растений филлобионтами ведут к ухудшению и снижению эстетической, а также рекреационной ценности зеленых насаждений. В составе комплекса вредителей свидин и деренов присутствует единственный минер – представитель семейства Agromyzidae – кизиловая минирующая муха (*Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830). Местами в декоративных зеленых насаждениях Беларуси она

ощутимо вредит этим кустарникам, наряду со скосярями (*Otiorynchus* spp.) и серой свидинно-злаковой тлей (*Anoecia corni* (F.)) [9]. Вид характеризуется повсеместным распространением и периодическими вспышками массового размножения в декоративных зеленых насаждениях [4], которые опосредуются повреждением листовых пластинок и снижением декоративности заселенных растений. Кизиловая минирующая муха, являясь фитофагом свидин, кизила и деренов, имеет двойственный статус, поэтому ее можно было бы считать представителем аборигенной фракции энтомофауны Беларуси в силу присутствия в аборигенной флоре свидины кроваво-красной (*C. sanguinea*). Однако данный вид находится на восточной границе естественного сформировавшегося ареала и регулярно отмечается лишь в искусственных зеленых насаждениях, преимущественно, в населенных пунктах В естественных лесных массивах, где произрастает свидина кроваво-красная, и куда проникает гораздо более широко распространенный дерен белый (*C. alba*), кизиловая минирующая муха пока не регистрировалась. Высказанные обстоятельства позволяют предполагать для *Ph. agromyzina* статус чужеродного для фауны (по меньшей мере, Восточной Беларуси) вида фитофагов.

Мины, образованные личинками *Ph. agromyzina*, верхнесторонние, змеевидные, узкие, длинные, неветвящиеся, постепенно нерезко расширяющиеся; экскременты располагаются в виде широкой коричневой полосы. Окукливание происходит обычно вне мины. На листе, особенно малоразмерном, мины *Ph. agromyzina* часто сливаются и образуют коллективную мину с неразличимыми границами.

Целью выполненных исследований являлось установление повреждаемости свидин и деренов в условиях зеленых насаждений городов Беларуси на основе определения относительной площади поврежденной листовой поверхности.

### Материалы и методы исследования

В рамках выполненных в 2017–2020 гг. обследований декоративных зеленых насаждений городов Беларуси (Бобруйск, Витебск, Гомель, Минск) был осуществлен отбор проб листьев кустарников рода *Cornus*, свидины кроваво-красной (*C. sanguinea*) и дерена белого (*C. alba*), поврежденных личинками *Ph. agromyzina*. Материал помещали в полиэтиленовые пакеты с zip-lock застежкой, что предотвращало высыхание листьев, и гербаризировали стандартным способом [10].

Изображения листовых пластинок с имеющимися повреждениями (рис. 1) получали сканированием гербарного материала (использован планшетный сканер Epson Perfection 4180 Photo, разрешение – 300 dpi). Поврежденность личинками агромизид листовых пластинок оценивалась параметром относительной площади поврежденной листовой поверхности, значения которого рассчитывались на основе данных по площади листовых пластинок и площади размещенных на них мин *Ph. agromyzina*, полученных средствами свободно распространяемого редактора компьютерной графики ImageJ [11].



Рис. 1. Мина *Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830 на листовой пластинке *Cornus alba* L.

Fig. 1. A mine of *Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830 on *Cornus alba* L. leaf plate

Для обработки количественных данных использован пакет статистического анализа PAST 4.05 [12]. В качестве доверительных интервалов средних использовали значения стандартной ошибки ( $\pm$ SE), статистических критериев достоверности различий – критерии Манна–Уитни и Колмогорова – Смирнова [12].

### Результаты исследования и их обсуждение

Данные по диапазонам варьирования, средним и доверительным интервалам средних значений показателей суммарной площади и относительной площади мин личинок кизиловой минирующей мухи

(*Ph. agromyzina*) представлены в табл. Они позволяют охарактеризовать повреждаемость личинками данного минера наиболее распространенных в зеленых насаждениях страны декоративных кустарников рода *Cornus*. Как свидетельствуют данные табл., суммарная площадь мин личинок *Ph. agromyzina* на листовых пластинках деренов и свидин варьировала в диапазоне от 0,23 до 3,67 см<sup>2</sup>. Это может свидетельствовать о наличии листовых пластинок с минами личинок, погибших на ранних стадиях своего развития. При визуализации распределения данных показателя площади отдельных мин для выборки листовых пластинок дерена белого (*C. alba*) 2017 г. из г. Витебска (рис. 2), на jitter plot наблюдается некоторое количество точек, которые находятся под основным сгущением. Таким образом, логично предположить, что они соответствуют минам одиночных личинок младших возрастов, так и не завершивших развитие. Следует отметить отсутствие явной визуальной дифференциации точек, соответствующих данным для мин личинок разных возрастов. Объяснением этого может быть фактор неопределенности числа личинок *Ph. agromyzina*, развивающихся в минах совместно. Таким образом, дифференциация размерных характеристик не просматривается ни по возрастам личинок (что вполне логично, поскольку пробы целенаправленно отбирались в период по завершении их развития), ни по числу особей в общей мине (что было бы ожидаемо).

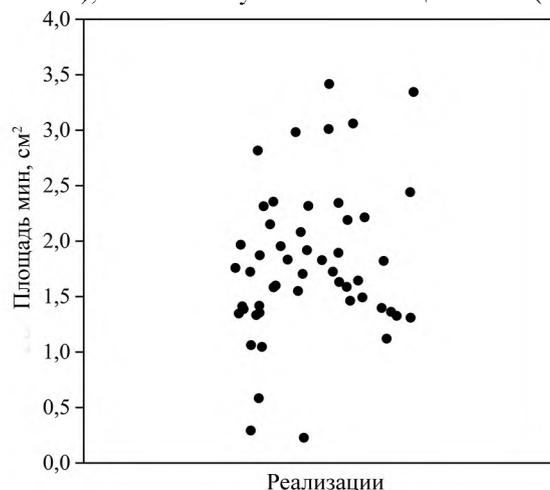


Рис. 2. Jitter plot для значений показателя площади отдельных мин личинок кизиловой минирующей мухи (*Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830) на листовых пластинках дерена белого (*Cornus alba* L.) в насаждениях г. Витебска (2017 г.)

Fig. 2. The scatter plot of the area (square) index values of individual mines of mining fly *Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830 larvae on the leaf plates of Siberian dogwood (*Cornus alba* L.) in green areas of Vitebsk (2017)

Таблица

Характеристика поврежденности листовых пластинок дерена белого (*Cornus alba* L.) и свидины кроваво-красной (*Cornus sanguinea* (L.) Opiz) личинками кизиловой минирующей мухи (*Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830) в зеленых насаждениях городов Беларуси

Table

The characteristics of damage caused to leaf blades of Siberian dogwood (*Cornus alba* L.) and lood twig dogwood (*Cornus sanguinea* (L.) Opiz) by larvae of miner fly *Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830 in urban green spaces in Belarus

Растение-хозяин	Город	Год	Суммарная площадь мин*, см <sup>2</sup>		Относительная площадь поврежденной листовой поверхности, %	
			средняя	диапазон варьирования	средняя	диапазон варьирования
<i>Cornus alba</i> L.	Минск	2017	1,66 ± 0,22	0,37–3,46	5,12 ± 1,08	1,72–16,67
		2018	1,81 ± 0,25	1,02–3,65	7,12 ± 2,18	1,62–25,28
		2019	1,48 ± 0,22	1,25–1,91	7,52 ± 1,04	5,74–9,33
	Витебск	2017	1,87 ± 0,11	0,23–3,67	16,98 ± 2,04	0,86–63,58
		2018	2,02 ± 0,18	1,44–3,51	18,12 ± 4,82	4,95–55,52
		2020	1,68 ± 0,12	1,01–2,36	10,07 ± 1,54	2,39–20,23
	Гомель	2019	1,54 ± 0,14	1,10–2,27	24,47 ± 6,23	9,98–57,2
Бобруйск	2020	1,14 ± 0,17	0,86–1,44	5,33 ± 1,74	2,95–8,71	
<i>Cornus sanguinea</i> L.	Минск	2020	1,18 ± 0,16	0,32–2,15	3,81 ± 0,9	0,99–14,66
	Витебск	2017	1,41 ± 0,13	1,04–1,93	7,39 ± 2,03	3,94–16,43

\*Суммарная площадь всех мин на отдельных листовых пластинках.

Рассмотрение представленных данных по суммарной площади мин личинок кизиловой минирующей мухи и относительной площади поврежденной листовой поверхности свидин и деренов, сгруппированных по видам *Cornus* и географическим территориям (городам), позволяет констатировать, что минимальной была средняя суммарная площадь мин на отдельных листовых пластинках дерена белого в 2020 г. в г. Бобруйске, максимальной – на листовых пластинках также дерена белого в 2020 г. – в г. Бресте. Для г. Бреста в 2020 г. для дерена белого отмечался максимальный диапазон варьирования признака (от 0,95 до 11,66 см<sup>2</sup>), что было обусловлено, очевидно, присутствием в пробах листовых пластинок с минами нескольких, успешно завершающих развитие личинок *Ph. agromyzina*.

С использованием непараметрических критериев парных различий медиан выборок Манна–Уитни и интервальных различий Колмогорова–Смирнова выполнен анализ данных по суммарной площади мин личинок кизиловой минирующей мухи на листовых пластинках произрастающих в Минске и Витебске деренов и свидин. Сравнение данных для разных лет исследований, в частности, для 2018–2019, 2018–2020 и 2019–2020 гг. показало отсутствие статистически значимых различий ( $p > 0,05$ ) суммарной площади мин личинок *Ph. agromyzina* на листовых пластинках дерена белого, произрастающего в зеленых насаждениях этих городов. Однако выявлены статистически значимые ( $p < 0,01$ ) различия в суммарной площади мин на листовых пластинках дерена белого и свидины кроваво-красной, то есть трофоэкология кизиловой минирующей мухи при развитии на разных представителях рода *Cornus* отличается.

Средние значения показателя относительной площади поврежденной личинками *Ph. agromyzina* листовой поверхности свидин и деренов оказались минимальными (3,81 %) для свидины кроваво-красной в 2020 г. в зеленых насаждениях Минска и максимальными (24,47 %) для дерена белого в 2019 г. в зеленых насаждениях Гомеля.

Для Витебска в 2017 г. отмечался максимальный диапазон варьирования признака: от 0,86 до 63,58 %. С одной стороны, это может быть связано с присутствием в выборке листьев с минами личинок, погибших на младших возрастах, с другой – относительно «мелкими» листовыми пластинками, площадь которых меньше, чем у растений из зеленых насаждений других городов страны. И действительно, в 2017 г. средняя площадь листовых пластинок *C. alba* в обследованных декоративных посадках Минска составляла 42,59 см<sup>2</sup>, тогда как Витебска – лишь 16,99 см<sup>2</sup>. Наблюдаемые различия были статистически достоверны ( $p < 0,05$ ), что подтверждено с использованием непараметрических критериев различий Манна–Уитни, а также Колмогорова–Смирнова.

Относительные площади поврежденной личинками кизиловой минирующей мухи листовой поверхности дерена белого и свидины кроваво-красной достоверно ( $p < 0,05$ ) различались, как и площади самих листовых пластинок ( $p < 0,05$ ).

Для *C. sanguinea* в зеленых насаждениях Минска и Витебска отсутствовали достоверные ( $p > 0,05$ ) различия медиан суммарной площади мин и площади листовых пластинок, однако имели место статистически достоверные ( $p < 0,05$ ) интегральные различия, оцениваемые критерием Колмогорова–Смирнова.

Таким образом, повреждаемость деренов и свидин в зеленых насаждениях городов Беларуси, оцениваемая показателем относительной площади поврежденной листовой поверхности, удерживается из года в год в среднем на относительно низком (до 25 %) уровне (при том, что поврежденность отдельных листовых пластинок может достигать 64 % листовой поверхности). Это позволяет отнести данный вид фитофагов к группе видов с умеренной вредоносностью в условиях декоративных насаждений страны.

## Заключение

Таким образом, используя показатель относительной площади поврежденной листовой поверхности:

1) оценена повреждаемость личинками кизиловой минирующей мухи (*Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830) деренов и свидин на примере широко представленных в зеленых насаждениях интродуцированного дерена белого (*Cornus alba* L.) и аборигенной свидины кроваво-красной (*Cornus sanguinea* (L.) Opiz) в условиях декоративных зеленых насаждений городов Беларуси. Значения параметра для отдельных листовых пластинок варьировали в диапазоне от 0,86 до 63,58 %, при этом средние значения для выборок из разных городов не превышали 24,47 %;

2) наблюдаемые статистически достоверные ( $p < 0,05$ ) различия относительной площади поврежденной личинками *Ph. agromyzina* листовой поверхности для Минска и Витебска сопровождаются статистически достоверными ( $p < 0,05$ ) различиями площади листовых пластинок *C. alba*;

3) суммарная площадь мин личинок *Ph. agromyzina* на отдельных листовых пластинках *Cornus* варьировала в диапазоне от 0,23 до 3,65 см<sup>2</sup>, при этом различия медиан выборок и интегральные различия между выборками, оцениваемые с использованием непараметрических критериев Манна–Уитни и Колмогорова–Смирнова соответственно, не были статистически достоверны ( $p > 0,05$ ) при сопоставлении данных для разных городов (Минск и Витебск) и разных лет как для *C. alba*, так и *C. sanguinea*. Однако по рассматриваемому показателю между выборками для этих двух видов *Cornus* различия статистически достоверны ( $p < 0,05$ ).

### Библиографические ссылки

1. Černý M. Additional records of Agromyzidae (Diptera) from the West Palaearctic Region. *Čas. Slez. Muz. Opava (A)*. 2013;62:281–288. DOI: 10.2478/cszma-2013-0028.
2. Волосач МВ. Краткий обзор минирующих мух (Diptera, Agromyzidae) фауны Беларуси. В: Бородин ОИ, Цинкевич ВА, редакторы. В: *Итоги и перспективы развития энтомологии в Восточной Европе. Сборник статей II Международной научно-практической конференции; 6–8 сентября 2017 г. Минск, Беларусь*. Минск: А. Н. Вараксин; 2017. с. 112–115.
3. Civelek HS, Onder F. An investigations on the role of leaf miners (Diptera: Agromyzidae) on transmission of plant diseases. *Turkish Journal of Entomology*. 1997; 21(3): 233–241.
4. Волосач МВ, Буга СВ. Комплексная оценка вредоносности минирующих мух (Diptera: Agromyzidae) – вредителей декоративных древесных растений Беларуси. *Защита растений*. 2019; 43:220–229.
5. The Plant List. Version 1.1 [Internet]. [Cited 2021 March 5]. Available from: <http://www.theplantlist.org>.
6. Юркевич ИД. *Выделение типов леса при лесохозяйственных работах: вспомогательные таблицы*. Минск: Наука и техника, 1980; 120 с.
7. Гаранович ИМ, Шпитальная ТВ, Титок ВВ. Генофонд нетрадиционных культур садоводства в ЦБС НАН Беларуси. В: *Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада* [Интернет]. [Процитировано 5 марта 2021 г.]. 2017;144(1):16–20. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/genofond-netraditsionnyh-kultur-sadovodstva-v-tsbs-nan-belarusi>.
8. Сидорович ЕА., Гаранович ИМ, Чаховский АА. *Ассортимент декоративных древесных и кустарниковых растений для зеленого строительства Беларуси и рекомендации по оптимизации условий выращивания сеянцев*. Минск: Техналогия; 1997. 62 с.
9. Сауткин ФВ. Комплекс насекомых – вредителей деренов (*Cornus* spp.) в условиях зеленых насаждений Беларуси. В: *Роль ботанических садов и дендрариев в сохранении, изучении и устойчивом использовании разнообразия растительного мира: Материалы Международной научной конференции, посвященной 85-летию Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси; 6–8 июня 2017 г.; Минск, Беларусь. Часть 2*. Минск: Медисонт; 2017. с. 419–421.
10. Гельтман ДВ, редактор. *Гербарное дело: справочное руководство*. Кью: Королевский ботанический сад; 1995. 341 с.
11. Сауткин ФВ. *Использование программных средств анализа цифровых изображений для определения размерных характеристик биологических объектов*. Минск: БГУ; 2013. 28 с.
12. PAST 4 manual [Internet]. [Cited 2021 March 5]. Available from: <https://www.nhm.uio.no/english/research/infrastructure/past/downloads/past4manual.pdf>.

### References

1. Černý M. Additional records of Agromyzidae (Diptera) from the West Palaearctic Region. *Čas. Slez. Muz. Opava (A)*. 2013; 62: 281–288. DOI: 10.2478/cszma-2013-0028.
2. Volosach MV. A brief overview of mining flies (Diptera, Agromyzidae) of the fauna of Belarus. In: Borodin OI, Tsinkevich VA, editors. *Itogi i perspektivy razvitiya entomologii v Vostochnoi Evrope: sbornik statei II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii; 6 – 8 sentyabrya 2017 g.; Minsk, Belarus* [Results and prospects of entomology development in Eastern Europe: collection of articles of the II International scientific and practical conference; 2017 September 6–8; Minsk, Belarus]. Minsk: A. N. Varaksin; 2017. p. 112–115. Russian.
3. Civelek HS, Onder F. An investigations on the role of leaf miners (Diptera: Agromyzidae) on transmission of plant diseases. *Turkish Journal of Entomology*. 1997; 21(3): 233–241.
4. Volosach MV, Buga SV. *Kompleksnaya otsenka vredonosnosti miniruyushchikh mukh (Diptera: Agromyzidae) – vrediteli dekorativnykh drevesnykh rastenii Belarusi* [Complex harmfulness assessment of mining flies (Diptera: Agromyzidae) – pests of ornamental woody plants in Belarus]. *Zashchita rastenii*. [Plant protection]. 2019; 43: 220–229. Russian.
5. The Plant List. Version 1.1 [Internet]. [Cited 2021 March 5]. Available from: <http://www.theplantlist.org>.
6. Yurkevich ID. *Vydelenie tipov lesa pri lesoustroitel'nykh rabotakh: vspomogatel'nye tablitsy* [Identification of forest types during forest management works: supporting schedules]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1980; 120 p. Russian.
7. Garanovich IM, Shpital'naya TV, Titok VV. Gene pool of non-traditional horticultural crops in the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus. In: *Sbornik nauchnykh trudov Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada*. [Internet]. [Cited 2021 March 5]. 2017;144(1):16–20. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/genofond-netraditsionnyh-kultur-sadovodstva-v-tsbs-nan-belarusi>. Russian.
8. Sidorovich EA, Garanovich IM, Chahovskiy AA. *Assortiment dekorativnykh drevesnykh i kustarnikovyykh rastenii dlya zelenogo stroitel'stva Belarusi i rekomendatsii po optimizatsii usloviy vyrashchivaniya seyantsev* [Assortment of ornamental trees and shrubs for green building in Belarus and recommendations for optimizing the conditions for growing seedlings]. Minsk: Tekhnologiya; 1997. 62 p. Russian.
9. Sautkin FV. *Kompleks nasekomykh – vrediteli derenov (Cornus spp.) v usloviyakh zelenykh nasazhdenii Belarusi* [The complex of insects – pests of dogwoods (*Cornus* spp.) under the conditions of green stands in Belarus]. In: *Rol' botanicheskikh sadov i dendrariyev v sokhranenii, izuchenii i ustoychivom ispol'zovanii raznoobraziya rastitel'nogo mira. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 85-letiyu Tsentral'nogo botanicheskogo sada Natsional'noi akademii nauk Belarusi; 6–8 iyunya 2017 g.* Minsk, Belarus'. Volume 2. Minsk: Medisont; 2017. p. 419–421. Russian.
10. Gel'tman DV, editor. *Gerbarnoe delo: spravochnoe rukovodstvo* [Herbarium: reference guide]. K'yu: Korolevskiy botanicheskii sad; 1995. 341 p. Russian.
11. Sautkin VF. *Ispol'zovanie programmykh sredstv analiza tsifrovyykh izobrazhenii dlya opredeleniya razmernyykh kharakteristik biologicheskikh ob'ektov* [The use of digital image analysis software for determining the dimensional characteristics of biological objects]. Minsk: BGU; 2013. 28 p. Russian.
12. PAST 4 manual [Internet]. [Cited 2021 March 5]. Available from: <https://www.nhm.uio.no/english/research/infrastructure/past/downloads/past4manual.pdf>.

Статья поступила в редколлегию 08.04.2021.  
Received by editorial board 08.04.2021.

УДК 574.587+578.087(282.247.431.2)+595.7(476)2

## МЕТОДЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ВИДОВОГО СОСТАВА НАСЕКОМЫХ РАЗЛИЧНЫХ МЕСТООБИТАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ R

Г. Г. СУШКО<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Витебский государственный университет имени П. М. Машерова,  
пр. Московский, 33, 210038, г. Витебск, Беларусь

Анализ публикаций по экологии сообществ, включающих насекомых, доступных в международной базе данных PubMed Central, свидетельствует, что наиболее распространенной схемой оценки видового состава различных местообитаний является сравнение с помощью многофакторного дисперсионного анализа (PERMANOVA) и теста ANOSIM, визуализация выявленных различий с применением ординации (NMDS). Завершает схему выявления видов, в наибольшей мере обуславливающих различия в выборках, способ с использованием процедур IndVal и SIMPER. Данные приемы анализа возможно реализовать в программной среде R, которая в настоящее время является общепризнанным стандартом в научных публикациях в мире. Дан краткий обзор методов сравнительного анализа видового состава на примере насекомых за последние пять лет. Приведена последовательность команд для их реализации в программной среде R с использованием результатов собственных исследований.

**Ключевые слова:** видовой состав; сравнительный анализ; насекомые; экология сообществ; программная среда R.

## METHODS OF THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INSECT SPECIES COMPOSITION IN DIFFERENT HABITATS USING THE SOFTWARE ENVIRONMENT R

G. G. SUSHKO<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Vitebsk State University named after P. M. Masherova,  
33 Moscow Avenue, Vitebsk 210038, Belarus

Analysis of publications on the ecology of communities, in focus insects, over the past five years, available in the international database PubMed Central, showed that the most common scheme for assessing the species composition of different habitats are comparison using multivariate analysis of variance (PERMANOVA) and ANOSIM test, visualization of the differences using ordination (NMDS). The scheme is completed by identifying the species that are most responsible for the differences in the samples, using the IndVal and SIMPER procedures. All these methods can be implemented in the R software environment, which is currently a generally recognized standard in scientific publications in the world. The presented article includes a brief overview of the methods of comparative analysis of the insect species composition. The program code for this implementation in R using the results of our own research is also given.

**Keywords:** species composition; comparative analysis; insects; community ecology; software environment R.

### Образец цитирования:

Сушко ГГ. Методы сравнительного анализа видового состава насекомых различных местообитаний с использованием программной среды R. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2021;2:21–28.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-21-28>

### For citation:

Sushko GG. Methods of the comparative analysis of the insect species composition in different habitats using the software environment R. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2021;2:21–28. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-21-28>

### Автор:

*Геннадий Геннадьевич Сушко* – доктор биологических наук, доцент, заведующий кафедрой экологии и географии.

### Author:

*Gennadi G. Sushko*, doctor of science (biology), docent, head of the department of ecology and geography.  
[genmadis@rambler.ru](mailto:genmadis@rambler.ru)

## Введение

Одной из важнейших и часто используемых процедур при оценке структурно-функциональной организации экологических систем является сравнение их видового состава. Во второй половине прошлого века в арсенале исследователей появились схемы, включающие анализ структуры доминирования или встречаемости видов с использованием специальных шкал, кластерный анализ и индексы сходства (Жаккара, Сьеренсена и др.), которые учитывают различия в выборках [1]. В связи с развитием компьютерных технологий, а также с разработкой и постоянным усовершенствованием специализированного программного обеспечения, начали появляться новые возможности, способствующие в наше время более детальному анализу данных. Однако есть и негативные моменты. В частности, серьезной проблемой можно считать недостаточное количество литературы на русском языке, посвященной методам сравнительного анализа видового состава [2; 3]. Отдельные методы можно обнаружить в монографиях В. К. Шитикова с соавторами «Макроэкология речных сообществ: концепции, методы, модели» (2012) [4], «Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R» [5]. Детальный обзор методик сравнительного анализа видового состава ассамблей растений и животных можно найти преимущественно в англоязычной литературе [6; 7].

В наши дни для анализа данных, в том числе и в биологии, наиболее мощной платформой становится статистическая среда R. Команда разработчиков со всего мира постоянно создает и поддерживает дополнительные пакеты, значительно расширяющие ее возможности [8]. Некоторые из них разработаны и для экологических исследований. В отличие от R, большинство коммерческих программных продуктов, работающих по достаточно жестким шаблонам, далеко не всегда могут удовлетворить современного исследователя. Единственное их достоинство для биологов, не владеющих навыками программирования, – отсутствие необходимости писать программный код. Однако за последнее десятилетие вышли в свет несколько книг по R на русском языке, которые позволяют восполнить этот пробел [8–10]. На современном этапе исследований в биологии требуется комбинировать различные типы анализа и визуализировать их результаты. Поэтому, бесплатная программная среда R, которая позволяет решать широкий круг вопросов, является безусловным лидером среди свободно распространяемых систем статистического анализа. Ведущие университеты мира, аналитики крупнейших компаний и исследовательских центров постоянно используют R при проведении расчетов и создании крупных информационных проектов. Кроме того, R становится общепризнанным стандартом в научных публикациях [9].

Для экологов R также представляет широкие возможности, сочетающие как общепринятые, так и новые методики анализа данных, в том числе и касающиеся сравнительной характеристики видового состава. В частности, пакеты *vegan* (Community Ecology Package), *BiodiversityR* (Package for Community Ecology and Suitability Analysis), *labdsv* (Ordination and Multivariate Analysis for Ecology) и др. [11; 12].

Одними из наиболее популярных модельных объектов в экологических исследованиях являются насекомые вследствие их многочисленности и высокого видового богатства. В зарубежных публикациях по энтомологии и экологии насекомых применяется достаточно широкий спектр методов сравнения видового состава. Однако зачастую у исследователя, особенно начинающего, возникают проблемы выбора конкретного метода и его целесообразности в определенном случае. В связи с этим целью данной работы было обобщение основных методик сравнительного анализа видового состава насекомых, используемых в настоящее время в синэкологических исследованиях, а также методики их реализации в статистической среде R.

## Материалы и методы исследования

В качестве материала для обобщения методик сравнительной оценки видового состава насекомых нескольких местообитаний послужил анализ статей, размещенных в открытом доступе в международной базе данных PubMed Central (PMC) [13]. Проанализировано 350 работ за последние 5 лет по таким показателям, как методы ординации и статистические тесты и процедуры.

Рассмотрены возможности и ограничения к применению наиболее часто используемых методов сравнительного анализа видового состава. На основании этого предпринята попытка формирования наиболее оптимальной схемы анализа и ее демонстрация на примере результатов собственных исследований с использованием общедоступного программного обеспечения R (version 2.15.2, R Development Core Team 2010) [14].

## Результаты исследования и их обсуждение

Анализ научных источников выявил, что в 62,85 % публикаций, где сравнивается видовой состав насекомых нескольких (более двух) местообитаний, для визуализации используются методы ординации. В 48,57 % из их числа таким методом было неметрическое многомерное шкалирование (NMDS). Реже применялись анализ главных координат – PCoA (8,57 %) и главных компонент – PCA (5,71 %).

Для проверки достоверности различий видового состава нескольких местообитаний использовались тесты, основанные на статистических гипотезах, – это многофакторный дисперсионный анализ

PERMANOVA (25,71 %) и анализ сходства ANOSIM (22,85 %). Процедуры для выявления наиболее характерных видов, вносящих различия между ассамблеями, были выявлены в анализируемых публикациях реже. В их числе процедуры IndVal (Indicator Value) (14,28%) SIMPER (Similarity Percentages) (5,71 %).

Таким образом, наиболее распространенной схемой анализа является сравнение видового состава на наличие различий с помощью тестов, основанных на таких статистических гипотезах, как многофакторный дисперсионный анализ (PERMANOVA) и анализ сходства (ANOSIM), визуализация выявленных различий с применением ординации (NMDS). Завершает схему выявление видов в наибольшей мере обуславливающих различия в выборках, как правило, соответствующих определенным местообитаниям, с использованием процедур IndVal и SIMPER.

*Краткая характеристика основных этапов сравнения видового состава.* Проверку того, значимо ли отличаются группы объектов (строки, соответствующие выборкам, полученным в нескольких биотопах) на основе набора их атрибутов (столбцов, соответствующих видам) в многомерной таблице данных можно осуществить с помощью тестов, основанных на статистических гипотезах ( $H_0$  – достоверные различия отсутствуют,  $H_a$  – есть достоверные различия). Как указано выше, чаще всего для сравнения различий видового состава используются тесты PERMANOVA и ANOSIM, которые не требуют нормального распределения. Большинство экологических данных, включающих перечень видов и их обилий, не соответствует закону нормального распределения, что обусловлено высоким количеством видов с низкой численностью, преобладанием нескольких видов и наличием большого числа нулевых значений в наборе данных [15].

**Тест PERMANOVA** (Permutational multivariate analysis of variance) является непараметрическим аналогом многомерного дисперсионного анализа (MANOVA). Метод получил широкое распространение в исследованиях по экологии сообществ, так как не требует нормального распределения. PERMANOVA позволяет использовать любую меру расстояния между объектами, а не только расстояние Эвклида, и терпимо относится к не независимым переменным. Используемая статистика теста представляет собой соотношение псевдо-F, аналогичное F в ANOVA [15–17]. Для выполнения PERMANOVA в R предназначена функция *adonis()* в пакете *vegan* [18].

**Тест ANOSIM** (Analysis Of Similarities). Эта непараметрическая процедура проверяет значимые различия между двумя или более группами на основе определенной меры расстояния. Она сравнивает ранги расстояний между группами с рангами расстояний внутри групп. На основе средних значений этих двух типов рангов формируется итоговая статистическая мера R-тест. Если  $R = 1$ , то сообщества очень сильно различаются, если  $R = 0$  – они полностью сходны. Значения R больше 0,75 принято интерпретировать как хороший уровень различий, R больше 0,5 – наличие различий, R меньше 0,25 – как едва различимые различия. Значения R ниже 0 предполагают, что различия внутри групп больше, чем различия между группами [6]. Тест делает меньше предположений, чем MANOVA, поскольку он основан на рангах расстояний. Вследствие этого он хорошо применим для сравнения данных выборочных совокупностей по видовому составу, где сравниваются группы выборок, соответствующие различным биотопам. Для этого все группы должны иметь сопоставимые внутригрупповые дисперсии, чтобы избежать ложно значимых результатов. При сравнении выборок с высокими различиями дисперсий значения R могут быть сильно завышены, даже если нет реальных различий [19]. Для выполнения ANOSIM в R предназначена функция *anosim()* в пакете *vegan* [18].

Визуализация различий видового состава, выявленного с помощью тестов, как правило, осуществляется с помощью ординации. Ранее мы выяснили, что используются такие методы, как NMDS, PCoA и PCA. Среди них реже всего применяется анализ главных компонент, так как он требует нормального распределения, линейной зависимости и относительно коротких градиентов в структуре данных. Такие данные в экологических исследованиях редки, но возможны. К тому же улучшить ситуацию может их преобразование, например логарифмирование, что делает использование PCA аргументированным. С другой стороны, анализ главных компонент основан только на мере расстояния Эвклида, что также ограничивает его применение для сравнения видового состава [16; 17]. Анализ главных координат в этом отношении является более гибким, так как позволяет выбирать меру расстояния исследователю самостоятельно. Однако в PCoA наличие в строках таблицы данных сильно варьирующих значений (в нашем случае обилие определенного вида) может заметно различаться в ряду местообитаний и сильно влиять на ординацию, делая вклад других объектов (других видов) менее заметными [7]. Для выполнения PCoA в R предназначены функции *cmdscale()* и *ordiplot()* из пакета *vegan*, функция *pcoa()* в пакете *ape* [11; 12; 18].

**Ординация NMDS** (Non-metric multidimensional scaling) оказалась наиболее подходящим и часто применяемым методом для сравнения видового состава насекомых, зарегистрированных в различных биотопах. Это обусловлено тем, что неметрическое многомерное шкалирование не требует нормального распределения данных и позволяет выбрать из множества различных мер подходящее расстояние. В экологии, чаще всего, используют расстояние Брея–Кертиса, которое учитывает как наличие/отсутствие видов, так и их численность. Графики NMDS – отличный инструмент, потому что могут сжать информацию о большом количестве видов и их обилиях в различных местообитаниях в ординационном пространстве, отражая их реальные тренды биотопического распределения. На графике NMDS точки соответствуют видам. Чем ближе

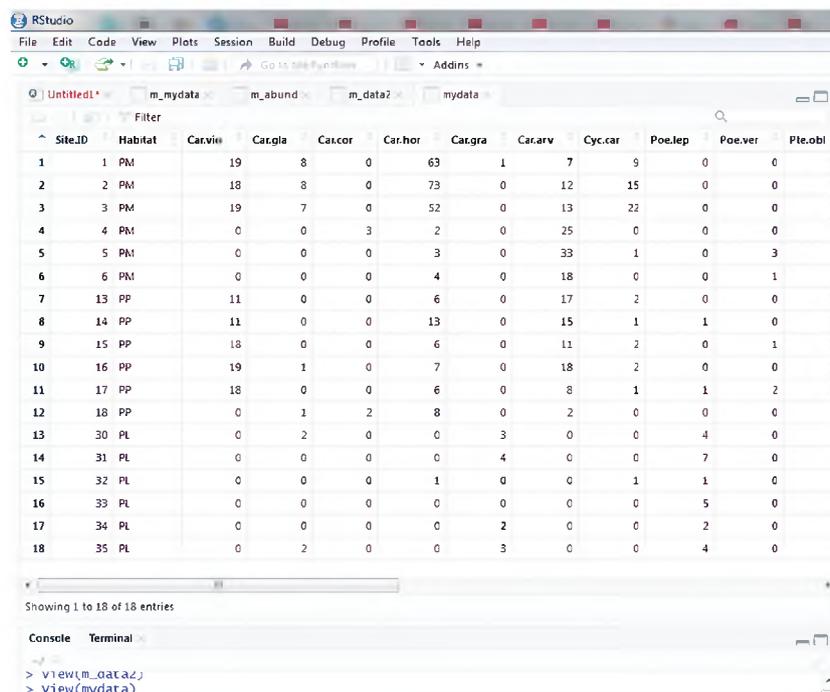
точки расположены в пространстве ординации, тем более схожи их сообщества [2; 6]. Для выполнения NMDS в R предназначены функции *metaMDS()*, *ordiplot()*, *ordisurf()*, *and envfit()* пакета *vegan* [18].

Для констатации различий видового состава в разных биотопах достаточно результатов тестов ANOSIM или PERMANOVA. Однако если вы хотите более детально выяснить, какие виды статистически более многочисленны в одной группе по сравнению с другой и ответственные за различия видового состава, то можно выполнить такие анализы, как SIMPER или IndVal [11; 12].

**SIMPER** (Similarity Percentage). Это простой метод оценки того, какие таксоны (виды) вносят наибольший вклад (в %) в различия анализируемых сообществ. Для сравнения выборок чаще всего используется мера сходства Брея–Кертиса, но также можно применить и другие меры расхождения. Если анализируется более двух групп, вы можете сравнить по две группы (попарно) между собой по желанию, выбрав их из списка. Также можно объединить все выборки для выполнения общего анализа. При этом рассчитывается общий уровень различий для всех выборок [6]. Для выполнения NMDS в R предназначена функция *simper()* пакета *vegan* [18].

**IndVal** (Indicator Value). Выявление по встречаемости или численности небольшой группы индикаторных видов является полезным при долгосрочном мониторинге окружающей среды в целях сохранения биоразнообразия. Процедура IndVal предназначена для измерения связи между видом и биотопом или группой биотопов. Сначала вычисляется индекс IndVal между видами и каждой группой участков одного типа местообитаний, а затем выделяется группа видов, ассоциированная в наибольшей степени с определенным типом. Значимость этой связи (p) проверяется с помощью теста перестановки (permutation test) [20]. Существует специальный пакет R для выявления видов-индикаторов *indicspecies*, в котором наиболее часто используется функция *multipatt()*. Данная функция приводит к списку видов в выборках, связанных с определенным типом местообитаний [21].

*Реализация основных этапов сравнения видового состава в статистической среде R.* Для демонстрации охарактеризованных выше методов используем результаты наших исследований видового состава жуков жужелиц (Coleoptera, Carabidae) в трех типах сосновых лесов (PP – *Pinetum pleuroziosum*, PM – *Pinetum myrtillosum*, PL – *Pinetum ledosum*), в каждом из которых получено по 6 выборочных совокупностей. Всего выявлено 24 вида. В табл. данных число особей видов расположены в столбцах, а биотопы в строках: анализируемая матрица включает 24 переменных и 18 наблюдений (рис. 1). Более подробную информацию о создании матриц данных, графиков и загрузке пакетов в RStudio можно найти в специальной литературе [8–12].



Site.ID	Habitat	Car.viv	Car.gla	Car.cor	Car.hor	Car.gra	Car.arv	Cyc.car	Poe.lep	Poe.ver	Ple.obl
1	1 PM	19	8	0	63	1	7	9	0	0	1
2	2 PM	18	8	0	73	0	12	15	0	0	1
3	3 PM	19	7	0	52	0	13	22	0	0	1
4	4 PM	0	0	3	2	0	25	0	0	0	0
5	5 PM	0	0	0	3	0	33	1	0	3	0
6	6 PM	0	0	0	4	0	18	0	0	1	0
7	13 PP	11	0	0	6	0	17	2	0	0	1
8	14 PP	11	0	0	13	0	15	1	1	0	1
9	15 PP	18	0	0	6	0	11	2	0	1	1
10	16 PP	19	1	0	7	0	18	2	0	0	1
11	17 PP	18	0	0	6	0	8	1	1	2	1
12	18 PP	0	1	2	8	0	2	0	0	0	0
13	30 PL	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0
14	31 PL	0	0	0	0	4	0	0	7	0	0
15	32 PL	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
16	33 PL	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0
17	34 PL	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0
18	35 PL	0	2	0	0	3	0	0	4	0	0

Рис. 1. Фрагмент анализируемой матрицы данных (скриншот RStudio)

Fig.1. Fragment of the analyzed data matrix (screenshot RStudio)

Введя следующий код, выполним тест ANOSIM с использованием пакета *vegan* и функции *anosim()*:

```
library(vegan)
mydata<-read.csv("C:/forR/mydata.csv", sep = ";", head=T)
abund = mydata[,3:ncol(mydata)]
```

```
m_abund = as.matrix(abund)
ano = anosim(m_abund, mydata$Habitat, distance = "bray", permutations = 9999)
ano
summary(ano)
```

Результаты анализа выглядят следующим образом:  $R=0.8189$ ,  $Significance=0.0001$ . Следовательно, между видовым составом жужелиц трех биотопов выявлены достоверные и значительные различия.

Проверим различия видового состава жужелиц другим способом, с помощью PERMANOVA (функция *adonis()* в пакете *vegan*), используя следующий код:

```
library(vegan)
mydata<-read.csv("C:/forR/mydata.csv", sep = ";", head=T)
abund = mydata[,3:ncol(mydata)]
m_abund = as.matrix(abund)
adonis(formula = m_abund ~ Habitat, data = mydata, permutations = 999)
```

На выходе мы получим традиционную таблицу результатов дисперсионного анализа. Исходя из представленных в ней результатов – PERMANOVA ( $Df=2$ ,  $F=14.66$ ,  $P=0.01$ ), также можно констатировать различие видового состава.

Для визуализации различий применим NMDS с использованием функции *metaMDS* пакета *vegan*, выбрав расстояние Брея–Кертиса:

```
library(vegan)
mydata<-read.csv("C:/forR/mydata.csv", sep = ";", head=T)
dat1 <- mydata[,3:24]
dat2 <- mydata[,1:2]
nmds = metaMDS(dat1,distance="bray", k=2)
plot(nmds)
```

После использования *plot(nmds)* мы получаем диаграмму ординации (рис. 2). Таким образом, имеется определенный тренд в расположении объектов, соответствующих биотопам и выборкам, но такой график дает мало информации.

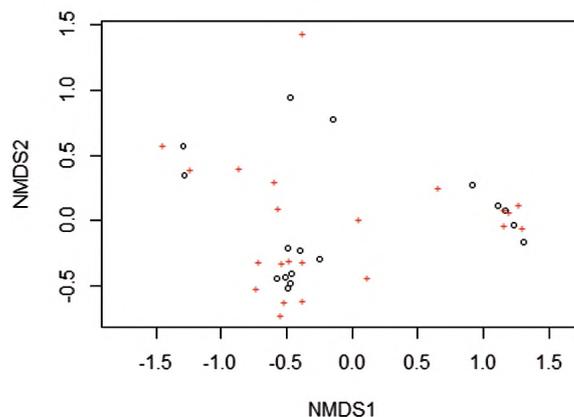


Рис. 2. Диаграмма ординации NMDS, полученная с использованием функции *plot()*

Fig. 2. NMDS ordination diagram obtained using the *plot()* function

Далее применим функцию *ordihull()*, которая дает возможность выделить области со сходными объектами. В нашем примере это будет выглядеть как *ordihull(nmds,groups=dat2\$Habitat,label=TRUE)*. Следовательно, на диаграмме можно увидеть сходство видового состава биотопов, обозначенных как PM и PP, области которых перекрываются, но это сходство не высоко, а также определить значительное отличие биотопа PL от остальных (рис. 3).

Пакет *vegan* обладает рядом других возможностей визуализации [18]. В частности, можно сделать акценты с помощью различных цветов, выделив области в виде эллипсов, центроидов и т. д.; увидеть, какие виды сконцентрированы в определенных областях диаграммы, применив *plot(nmds, type="t")* (рис. 4).

Для повышения информативности графика ординации можно комбинировать несколько функций одновременно, сначала создать пустой график (*type = «n»*), а затем, добавив виды и биотопы, выделить области и др. (рис. 5).

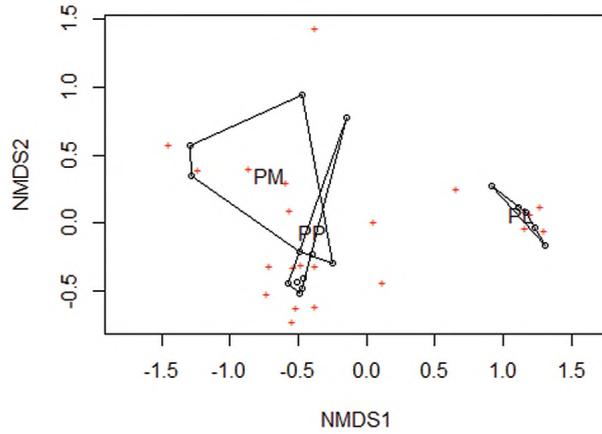


Рис. 3. Диаграмма ординации NMDS, полученная с использованием функции ordihull()

Fig. 3. NMDS ordination diagram obtained using the ordihull() function

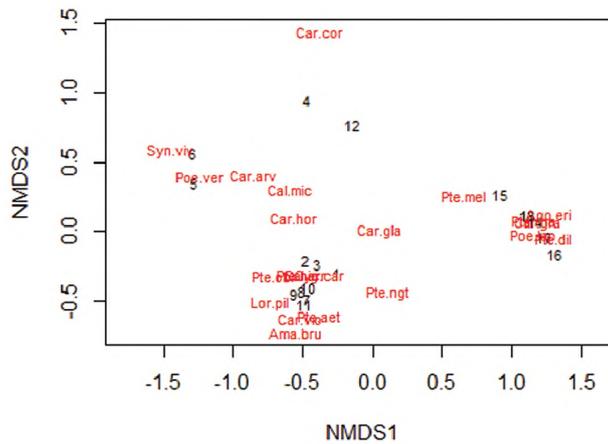


Рис. 4. Диаграмма ординации NMDS, полученная с использованием функции plot(type="t")

Fig. 4. NMDS ordination diagram obtained using the plot(type="t") function

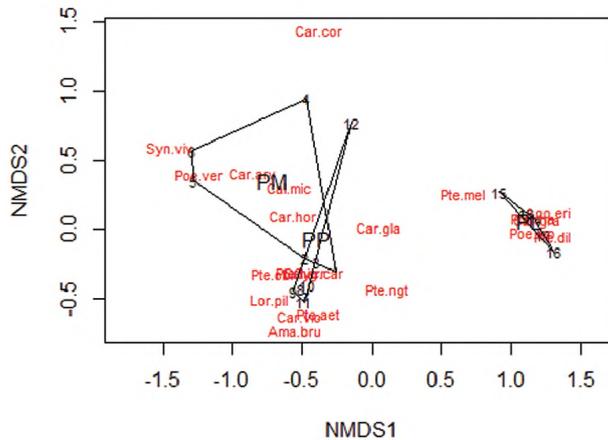


Рис. 5. Диаграмма ординации NMDS, полученная с использованием нескольких функций

Fig. 5. NMDS ordination diagram obtained using the combined function

Следующим этапом анализа различий видового состава может быть выявление видов, наиболее тесно ассоциированных с определенным биотопом, или их группой. Сначала применим процедуру IndVal пакета indicpecies. Для этого используем следующий код:

```
library(indicpecies)
mydata<-read.csv("C:/forR/mydata.csv", sep = ",", head=T)
```

```
abund = mydata[,3:ncol(mydata)]
habitat = mydata$Habitat
inv = multipatt(abund, habitat, func = "r.g", control = how(nperm=999))
summary(inv)
```

Результаты анализа демонстрируют, что 2–3 вида (программа сокращает названия видов до первых трех букв названия рода и названия вида) являются наиболее характерными для каждого из трех местообитаний (табл.).

Значения индекса IndVal могут варьировать от 0 (не является индикаторным видом) до 1 (идеальный индикатор) при статистической значимости  $p < 0,01$  [20]. В нашем примере большинство выявленных видов обладают высокой достоверной индикаторной значимостью ( $p < 0,01$ ) и высокими значениями индекса IndVal.

Таблица

#### Результаты анализа индикаторных видов (IndVal)

Table

##### Indicator Species Analysis Results (IndVal)

Вид	Биотоп	Значения индекса IndVal	Уровень значимости (p)
<i>Agonum ericeti</i> (Ago. eri)	PL	0,954	0,001
<i>Pterostichus rhaeticus</i> (Pte. rha)	PL	0,843	0,001
<i>Pterostichus diligens</i> (Pte. dil)	PL	0,832	0,002
<i>Calathus micropterus</i> (Cal. mic)	PM	0,779	0,004
<i>Carabus hortensis</i> (Car. hor)	PM	0,606	0,044
<i>Calathus erratus</i> (Cal. err)	PP	0,901	0,002
<i>Amara brunnea</i> (Ama. bru)	PP	0,824	0,006

Далее применим другой метод, который также используют для выявления видов, которые наиболее характерны для конкретного местообитания – SIMPER. Метод можно реализовать с помощью функции *simper()* пакета *vegan*:

```
library(vegan)
mydata<-read.csv("C:/forR/mydata.csv", sep = ";", head=T)
abund = mydata[,3:ncol(mydata)]
m_abund = as.matrix(abund)
sim = simper(m_abund, mydata$Habitat)
sim
summary(sim)
```

Следовательно, результаты анализа, помещенные в табл., демонстрирует совокупные вклады (в %) видов в структуру сообществ (в целях экономии места табл. не приводится; далее указаны только виды, имеющие значение для итогового анализа). В отличие от IndVal, SIMPER сравнивает относительные обилия видов в парах биотопов и выявляет те, которые вносят наибольшие различия, а не указывает на их связь с биотопом. В нашем примере такими парами были PM и PP, PM и PL, PP и PL. Наибольший вклад в различия (average dissimilarity) видового состава в паре PM и PP вносят виды *Pterostichus niger* (12 %), *Carabus hortensis* (10 %), *Calathus micropterus* (7 %), в паре PM и PL – виды *Agonum ericeti* (39 %), *Pterostichus niger* (10 %), *Carabus hortensis* (10 %), в паре PP и PL – *Agonum ericeti* (42 %) и *Pterostichus oblongopunctatus* (8 %). Вклад остальных видов составил менее 1%.

### Заключение

В заключение следует отметить, что методология сравнительного анализа видового состава различных местообитаний достаточно ограничена. Это обусловлено не соответствием в большинстве случаев количественных показателей обилия видов закону нормального распределения. Наиболее распространенными в наши дни схемами оценки видового состава являются сравнение с помощью многофакторного дисперсионного анализа (PERMANOVA) и теста ANOSIM, ординации (NMDS) и статистических процедур IndVal и xSIMPER. Все эти методы возможно реализовать в программной среде R, которая в настоящее время является общепризнанным стандартом в научных публикациях в мире и мощным инструментом, сочетающим все рассмотренные виды анализа данных.

## Библиографические ссылки

1. Песенко ЮА. *Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях*. Минск: Наука; 1982.
2. Сушко ГГ. Методы многомерного анализа данных в синэкологии насекомых. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020; 1:38–45.
3. Сушко ГГ. Использование методов анализа данных в энтомологических исследованиях. В: *Сборник статей III Международной научно-практической конференции, памяти В. А. Цинкевича*. Минск: ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам»; 2019. с. 381–383.
4. Шитиков ВК, Зинченко ТД, Розенберг ГС. *Макроэкология речных сообществ: концепции, методы, модели*. Тольятти: Кассандра; 2012.
5. Шитиков ВК, Розенберг ГС. *Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R*. Тольятти: Кассандра; 2013.
6. Clarke KR. Non-parametric multivariate analysis of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*. 1993;18:117–143.
7. Legendre P, Legendre L. *Numerical Ecology*. 2<sup>nd</sup> edition. Amsterdam: Elsevier; 1998.
8. Кабаков РИ. *R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R*. Москва: ДМК Пресс; 2014.
9. Мастыцкий СЭ, Шитиков ВК. *Статистический анализ и визуализация данных с помощью R*. Москва: ДМК Пресс; 2015.
10. Джеймс Г, Уиттон Д, Хасти Т, Тибширани Р. *Введение в статистическое обучение с примерами на языке R*. Москва: ДМК Пресс; 2016.
11. Borcard D, Gillet F, Legendre P. *Numerical Ecology with R*. Wien: Springer Nature; 2018.
12. Herve M. Aide-mémoire de statistique appliquée à la biologie. Construire son étude et analyser les résultats à l'aide du logiciel R. 2016.
13. PubMed Central (PMC) [Internet]. [Cited 2020 August 15]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/>
14. R Development Core Team (2010) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. [Internet]. Vienna: Austria. Available from: <https://www.R-project.org/>
15. Anderson MJ, Walsh DC. PERMANOVA, ANOSIM, and the Mantel test in the face of heterogeneous dispersions: what null hypothesis are you testing? *Ecological monographs*. 2013;83(4):557–574.
16. McCune B, Grace JB. *Analysis of ecological communities*. Glendened Beach: MjMSoftware Design; 2002.
17. Ramette A. Multivariate analyses in microbial ecology. *FEMS. Microbiological Ecology*. 2007; 62(2):142–160.
18. Oksanen J. *Multivariate Analysis in Ecology*. Lecture Notes. Finland: University of Oulu; 2004.
19. Warton DI, Wright TW, Wang Y. Distance-based multivariate analyses confound location and dispersion effects. *Methods in Ecology and Evolution*. 2012;3:89–101.
20. Dufrene M, Legendre P. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*. 1997;67:345–366.
21. De Caceres M, Legendre P. Associations between species and groups of sites: indices and statistical inference. *Ecology*. 2009;90(12):66–74.

## References

1. Pesenko Yu.A. *Principy i metody kolichestvennogo analiza v faunisticheskikh issledovaniyah* [Principles and methods of quantitative analysis in faunistic research]. Minsk: Nauka; 1982. Russian.
2. Sushko GG. Methods of multivariate data analysis in insect synecology. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;1:38–45. Russian.
3. Sushko GG. *Ispol'zovanie metodov analiza dannyyh v jentomologicheskikh issledovaniyah* [Use of data analysis methods in entomological research]. In: *Sbornik statej III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, pamjati V. A. Cinkevicha*. Minsk: GNPO «NPTS NAN Belarusi po bioresursam»; 2019. p. 381–383. Russian.
4. Shitikov VK, Zinchenko TD, Rozenberg GS. *Makroekologija rechnyyh soobshhestv: koncepcii, metody, modeli* [Macroecology of river communities: concepts, methods, models]. Togliatti: Kassandra; 2012. Russian.
5. Shitikov VK, Rozenberg GS. *Randomizacija i butstrep: statisticheskij analiz v biologii i jekologii s ispol'zovaniem R* [Randomization and bootstrap: a statistical analysis in biology and ecology with R use]. Togliatti: Kassandra; 2014. Russian.
6. Clarke KR. Non-parametric multivariate analysis of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*. 1993;18:117–143.
7. Legendre P, Legendre L. *Numerical Ecology*. 2<sup>nd</sup> edition. Amsterdam: Elsevier; 1998.
8. Kabacoff RI. *R in Action*. Data analysis and graphics with R. Shelter Island, New York: Manning Publications Co.; 2012.
9. Mastitsky SE, Shitikov VK. *Statisticheskij analiz i vizualizacija dannyyh s pomoshh'ju R* [Statistical analysis and data visualization using R]. Moscow: DMK Press; 2015. Russian.
10. James G, Witten D, Hastie T, Tibshirani R. *An Introduction to Statistical Learning*. New York: Springer; 2013.
11. Borcard D, Gillet F, Legendre P. *Numerical Ecology with R*. Wien: Springer Nature; 2018.
12. Herve M. Aide-mémoire de statistique appliquée à la biologie. Construire son étude et analyser les résultats à l'aide du logiciel R. 2016.
13. PubMed Central (PMC) [Internet]. [Cited 2020 August 15]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/>
14. R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. [Internet]. Vienna: Austria; 2010. Available from: <https://www.R-project.org/>
15. Anderson MJ, Walsh DC. PERMANOVA, ANOSIM, and the Mantel test in the face of heterogeneous dispersions: what null hypothesis are you testing? *Ecological monographs*. 2013;83(4):557–574.
16. McCune B, Grace JB. *Analysis of ecological communities*. Glendened Beach: MjMSoftware Design; 2002.
17. Ramette A. Multivariate analyses in microbial ecology. *FEMS. Microbiological Ecology*. 2007; 62(2):142–160.
18. Oksanen J. *Multivariate Analysis in Ecology*. Lecture Notes. Finland: University of Oulu; 2004.
19. Warton DI, Wright TW, Wang Y. Distance-based multivariate analyses confound location and dispersion effects. *Methods in Ecology and Evolution*. 2012;3:89–101.
20. Dufrene M, Legendre P. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*. 1997;67:345–366.
21. De Caceres M, Legendre P. Associations between species and groups of sites: indices and statistical inference. *Ecology*. 2009;90(12):66–74.

Статья поступила в редколлегию 08.02.2021.  
Received by editorial board 08.02.2021.

УДК 577.34:576.6:574.36:582.29:616.591-018

## ФОТОЗАЩИТНЫЕ, ЦИТОТОКСИЧЕСКИЕ И ФОТОМОДИФИЦИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА НЕПОЛЯРНЫХ ФРАКЦИЙ БИОМАССЫ ЛИШАЙНИКОВ В ОТНОШЕНИИ КУЛЬТУРЫ КЕРАТИНОЦИТОВ ЧЕЛОВЕКА (HaCAT)

О. М. ХРАМЧЕНКОВА<sup>1)</sup>, М. В. МАТВЕЕНКОВ<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,  
ул. Советская, 104, 246039, г. Гомель, Беларусь

<sup>2)</sup>Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Беларусь

*In vitro* оценены фотозащитные, цитотоксические и фотомодифицирующие свойства гексановых и бензольных экстрактов из распространенных в Беларуси лишайников *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes*, *Ramalina pollinaria* и *Xanthoria parietina* в отношении культуры кератиноцитов человека (HaCAT). Установлено, что данные экстракты не являются фотозащитными, обладают фотомодифицирующим действием при облучении культур кератиноцитов ультрафиолетом. Фотопротекторы, ослабляющие действие ультрафиолета в 1,6÷1,8 раз, – гексановый экстракт *E. prunastri* и бензольные экстракты *R. pollinaria* и *H. physodes* в концентрации 2,5 мкг/мл. Экстракты *C. arbuscula* и *X. parietina* являются фотосенсибилизаторами, усиливающими токсическое действие ультрафиолета в 10 и более раз, независимо от концентрации экстракта в питательной среде. Гексановые и бензольные экстракты лишайников *C. arbuscula* и *H. physodes* цитотоксичны в отношении культуры HaCAT. При увеличении дозы облучения кератиноцитов ультрафиолетом от нулевых до летальных значений, бензольный экстракт *R. pollinaria* выступал фотопротектором при концентрации 2,5 мкг/мл, и фотосенсибилизатором при более высоких концентрациях. Гексановые и бензольные экстракты *E. prunastri* и *H. physodes* проявляли сенсибилизационные свойства, возрастающие с увеличением концентрации экстрактов лишайников. Гексановый экстракт *C. arbuscula* и бензольный экстракт *X. parietina* были самыми мощными фотосенсибилизаторами.

**Ключевые слова:** экстракты лишайников; солнцезащитный фактор (SPF); критическая длина волны ( $\lambda_{\text{крит}}$ ); отношение УФ-А/УФ-Б; культуры кератиноцитов (HaCAT); ультрафиолет; полуингибирующая доза (ID<sub>50</sub>); фотопротекторы; фотосенсибилизаторы.

### Образец цитирования:

Храмченкова ОМ, Матвеевков МВ. Фотозащитные, цитотоксические и фотомодифицирующие свойства неполярных фракций биомассы лишайников в отношении культуры кератиноцитов человека (HaCAT). *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;2:29–35. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-29-35>

### For citation:

Khramchankova VM, Matveyenkau MV. Photoprotective, cytotoxic and photomodifying activity of lichen biomass non-polar fractions against human keratinocyte (HaCAT). *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;2:29–35. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-29-35>

### Авторы:

**Ольга Михайловна Храмченкова** – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры ботаники и физиологии растений биологического факультета.  
**Матвей Владимирович Матвеевков** – младший научный сотрудник лаборатории комбинированных воздействий.

### Authors:

**Volga M. Khramchankova**, PhD (biology), docent, associate professor at the department of chemistry, faculty of biology. [hramchankova@gsu.by](mailto:hramchankova@gsu.by)  
**Matsvei V. Matveyenkau**, junior researcher at the laboratory of combined exposures. [matvey.matveenkov@mail.ru](mailto:matvey.matveenkov@mail.ru)

## PHOTOPROTECTIVE, CYTOTOXIC AND PHOTOMODIFYING ACTIVITY OF LICHEN BIOMASS NON-POLAR FRACTIONS AGAINST HUMAN KERATINOCYTE (HaCAT)

V. M. KHRAMCHANKOVA<sup>a</sup>, M. V. MATVEYENKAU<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Francisk Skorina Gomel State University,  
108 Saveckaja Street, 246028 Gomel, Belarus

<sup>b</sup>Institute of Radiobiology, National Academy of Sciences of Belarus,  
4 Fiadzuninskaja Street, 246007 Gomel, Belarus

Corresponding author: Khranchankova V. M. (hramchenkova@gsu.by)

*In vitro*, the photoprotective, cytotoxic and photomodifying properties of hexane and benzene extracts from the widely distributed in Belarus lichens *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes*, *Ramalina pollinaria* and *Xanthoria parietina* in the culture of human keratinocytes (HaCAT), are estimated. It was found that these extracts are not photoprotective, they have a photomodifying effect upon irradiation of keratinocyte cultures with ultraviolet light. Hexane extract of *E. prunastri* and benzene extracts of *R. pollinaria* and *H. physodes* at a concentration of 2.5 µg/ml are photoprotectors that weaken the effect of ultraviolet radiation by 1.6 ÷ 1.8 times. Extracts of *C. arbuscula* and *X. parietina* are photosensitizers – they increase the toxic effect of ultraviolet radiation by 10 or more times, regardless of the concentration of the extract in the nutrient medium. Hexane and benzene extracts of *C. arbuscula* and *H. physodes* lichens are cytotoxic to the HaCAT culture. With an increase in the dose of ultraviolet irradiation of keratinocytes from zero to lethal values, the benzene extract of *R. pollinaria* acted as a photoprotector at a concentration of 2.5 µg / ml, and as a photosensitizer at higher concentrations. The hexane and benzene extracts of *E. prunastri* and *H. physodes* exhibited sensitizing properties that increased with an increase in the concentration of lichen extracts. *C. arbuscula* hexane extract and *X. parietina* benzene extract were the most potent photosensitizers.

**Keywords:** lichen extracts; sunscreen factor (SPF); critical wavelength ( $\lambda_{\text{crit}}$ ); UV-A / UV-B ratio; keratinocyte culture (HaCAT); ultraviolet; semi-inhibitory dose (ID<sub>50</sub>); photoprotectors; photosensitizers.

### Введение

Среди множества видов биологической активности экстрактов лишайников особый интерес представляют их фотопротекторные свойства, активно изучаемые в настоящее время многими специалистами, основываясь на наличии аналогичных свойств у многих растительных экстрактов [1–4]. Экстракты лишайников получают при помощи различных растворителей, среди которых чаще всего используют метанол, ацетон и хлороформ, существенно реже – гексан и бензол. Гексан и бензол позволяют получать экстракты, содержащие все группы лишайниковых веществ, извлекаемые неполярными растворителями. Целью настоящей работы – оценка цитотоксичности, фотозащитной и фотомодифицирующей активности гексановых и бензольных экстрактов из пяти видов распространенных в Беларуси лишайников в отношении культуры клеток кератиноцитов человека (HaCAT).

### Материалы и методы исследования

Биомассу лишайников *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot., *Evernia prunastri* (L.) Ach., *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Ramalina pollinaria* (Westr.) Ach. и *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. экстрагировали гексаном и бензолом в аппарате Сокелета. Растворитель удаляли, экстракты высушивали и использовали для исследований. Навески сухих экстрактов лишайников растворяли в этаноле, готовили растворы для фотометрии по методике, описанной в [5; 6]. Определяли оптическую плотность растворов в диапазоне длин волн 290–400 нм с шагом в 1 нм, используя этанол в качестве раствора сравнения. Средство измерения – УФ-спектрофотометр Solar PB 2201, измерительные кюветы – кварцевые. По результатам фотометрии рассчитывали величины SPF,  $\lambda_{\text{crit}}$  и соотношения УФ-А/УФ-Б – основных показателей фотозащитности экстрактов лишайников [7].

Использовали эпителиальные клетки человека линии HaCAT (кератиноциты), полученные в НИЛ проблем терморегуляции кафедры физиологии человека и животных Белорусского государственного университета. Кератиноциты культивировали согласно рекомендациям американской коллекции типовых культур (ATCC) [8]. Определение цитотоксичности экстрактов лишайников в отношении кератиноцитов, расчеты величины фактора изменения цитотоксичности (ФИЦ), изучение влияния дозы ультрафиолета и экстрактов лишайников на жизнеспособность клеточных культур выполняли по методике, изложенной в [5; 6]. Для выявления возможного участия антиоксидантных свойств экстрактов лишайников в минимизации последствий воздействия ультрафиолета на культуры клеток в схему эксперимента вводили Тролокс

(6-гидрокси-2,5,7,8-тетраметилхроман-2-карбоновой кислоты) в количествах, равных концентрациям экстрактов лишайников. Анализ результатов исследования производили с помощью программных продуктов Graph Pad Prism (Version 5.02) и Microsoft Excel.

### Результаты исследования и их обсуждение

При экстрагировании гексаном выход экстрактов не превышал двух процентов воздушно-сухой массы биомассы лишайников, бензолом – 5,4÷5,8 % (табл. 1).

Таблица 1

#### Фотозащитные свойства экстрактов лишайников

Table 1

#### Photoprotective properties of lichens extracts

Вид лишайников	Экстрагент	Выход экстракта, %	SPF	$\lambda_{\text{крит}}$ , нм	УФ-А/УФ-Б
<i>C. arbuscula</i>	гексан	1,6±0,29	6,9±0,31	375±4,4	0,98±0,093
	бензол	1,3±0,29	5,1±0,75	373±7,2	0,91±0,082
<i>E. prunastri</i>	гексан	1,9±0,17	13,7±0,98	373±3,9	0,88±0,061
	бензол	5,8±0,51	40,8±2,34	358±2,8	0,64±0,057
<i>H. physodes</i>	гексан	1,8±0,22	7,1±0,42	366±5,6	0,91±0,098
	бензол	5,4±0,46	15,6±0,99	358±4,6	0,82±0,079
<i>R. pollinaria</i>	гексан	1,6±0,37	10,9±0,87	366±3,9	0,75±0,061
	бензол	5,4±0,49	40,7±2,31	337±6,1	0,31±0,023
<i>X. parietina</i>	гексан	2,0±0,42	3,8±0,47	392±8,4	1,77±0,129
	бензол	2,5±0,32	5,3±0,69	392±5,7	1,93±0,234

По критериям, приведенным в [7], фотозащитными являются субстанции, характеризующиеся показателями  $SPF \geq 15,0$  и  $\lambda_{\text{крит}} \geq 373,0$ . Среди гексановых и бензольных экстрактов лишайников *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* фотозащитных не обнаружено, хотя по показателю УФ-А/УФ-Б (эффективность защиты от УФ-Б и УФ-А излучения) все они относятся к «максимальным».

Цитотоксические свойства гексановых и бензольных экстрактов лишайников отличались (табл. 2).

Таблица 2

#### Цитотоксический эффект экстрактов лишайников в отношении культуры кератиноцитов человека (HaCAT), оцененный с помощью МТТ-теста после 48 ч инкубации, (мкг/мл)

Table 2

#### Cytotoxic effects of lichen extracts on human keratinocytes culture (HaCAT) assessed by MTT assay after 48 h exposure, ( $\mu\text{g/ml}$ )

Вид лишайника	Экстрагент	IC <sub>10</sub> *	IC <sub>50</sub>	IC <sub>90</sub> *
<i>C. arbuscula</i>	гексан	15,4	27,8±2,39	50,0
	бензол	<1	27,0±3,61	>200
<i>E. prunastri</i>	гексан	28,4	52,4±3,23	86,6
	бензол	14,0	52,3±5,70	>200
<i>H. physodes</i>	гексан	22,5	32,7±2,18	47,3
	бензол	<1	37,1±4,20	102
<i>R. pollinaria</i>	гексан	27,7	48,6 ± 4,05	85,4
	бензол	<1	36,2 ± 2,85	79,6
<i>X. parietina</i>	гексан	4,4	>200	>200
	бензол	10,3	136,4 ± 33,03	>200

\*Значения IC<sub>10</sub> и IC<sub>90</sub> вычислены по уравнениям аппроксимации кривых влияния концентрации экстрактов лишайников на жизнеспособность культур клеток.

Установлено, что гексановые и бензольные экстракты лишайников *C. arbuscula* *H. physodes* токсичны для клеток культуры HaCAT. Бензольные экстракты лишайников вызывали 10 %-ное ингибирование метаболической активности кератиноцитов при более низких концентрациях, чем гексановые, тогда как гексановые экстракты вызывали 90 %-ное ингибирование клеточных культур при более низких концентрациях, чем бензольные.

Изложенное выше не относится к экстрактам лишайника *X. parietina*, чьи цитотоксические свойства проявляются при концентрациях, в 4,5÷7 раз превышающих нормативное значение ( $IC_{50} = 30$  мкг/мл).

Оценивали фотомодифицирующие свойства экстрактов лишайников. Для этого предварительно установили величины субтоксичных, полутоксичных и токсичных доз ультрафиолетового излучения в отношении клеточной культуры HaCAT. В качестве модификатора действия ультрафиолета использовали экстракты лишайников в концентрациях 2,5; 5,0 и 10 мкг/мл. Соотношение величин полуингибирующих доз ультрафиолета в опыте (в присутствии приведенных выше концентраций модификаторов в питательной среде) и контроле (без модификаторов) представляет собой фактор изменений цитотоксичности (ФИЦ). Если  $ФИЦ > 1$ , модификатор является фотопротектором, если  $ФИЦ < 1$  – фотосенсибилизатором. Для оценки возможного вклада антиоксидантных свойств экстрактов лишайников в изменение цитотоксического действия ультрафиолета применяли модельный антиоксидант Тролокс, который вносили в питательную среду в количестве 2,5; 5,0 и 10 мкг/мл вместо экстракта лишайника.

Установлено, что гексановые и бензольные экстракты лишайников *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* являются фотомодификаторами в отношении культур кератиноцитов человека. Выраженность фотомодифицирующего действия экстрактов лишайников зависит от их концентрации в питательной среде (рис. 1).

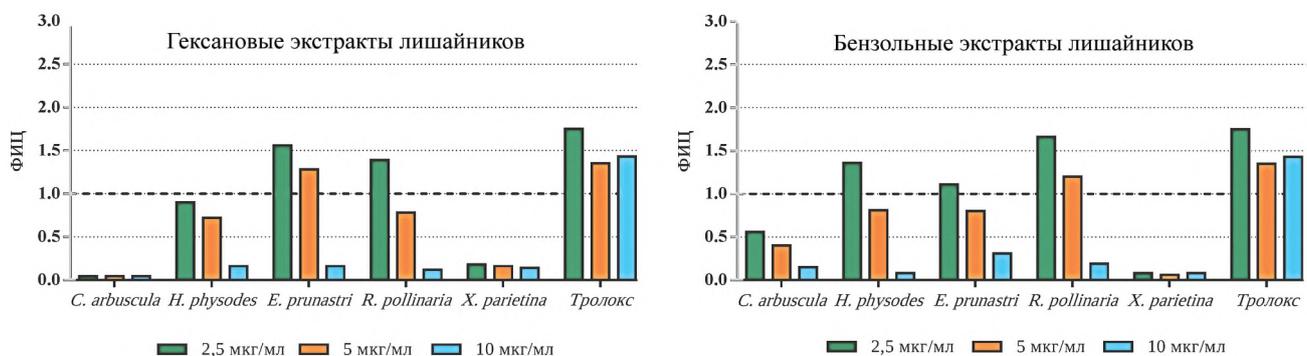


Рис. 1. Модификация цитотоксичности ультрафиолета в отношении культуры кератиноцитов человека (HaCAT) экстрактами лишайников

Fig. 1. Ultraviolet cytotoxicity modification against human keratinocytes culture (HaCAT) with lichens extracts

Наиболее выраженный фотозащитный эффект – снижение поражающего действия ультрафиолета в 1,6÷1,8 раз – вызывали гексановый экстракт *E. prunastri*, а также бензольные экстракты *R. pollinaria* и *H. physodes* в концентрации 2,5 мкг/мл. Данный эффект по силе равен аналогичной концентрации Тролокса, однако изменение его характера в сторону фотосенсибилизации с повышением концентрации экстракта лишайника в питательной среде позволяет предположить наличие иных, не антиоксидантных механизмов как защиты, так и ингибирования клеток.

Наиболее сильными фотосенсибилизаторами оказались гексановые и бензольные экстракты *C. arbuscula* и *X. parietina*, увеличивавшие токсическое действие ультрафиолета до 10 раз, независимо от концентрации экстракта в питательной среде. Гексановые экстракты *C. arbuscula* практически полностью подавляли жизнеспособность кератиноцитов при облучении минимальными дозами УФ, при этом независимо от концентрации экстракта в питательной среде. Следует отметить, что при содержании экстракта любого из пяти изучаемых видов лишайников, равном 10 мкг/мл, поражающее действие ультрафиолета резко усиливалось, то есть гексановые и бензольные экстракты *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* являются мощными фотосенсибилизаторами при данной концентрации раствора.

Гексановый экстракт *R. pollinaria* и бензольный экстракт *E. prunastri* в концентрации 5 мкг/мл проявляли умеренную фотосенсибилизирующую активность.

Установленные закономерности модификации чувствительности кератиноцитов к ультрафиолету проявлялись также в условиях возрастания дозы ультрафиолетового излучения (рис. 2).

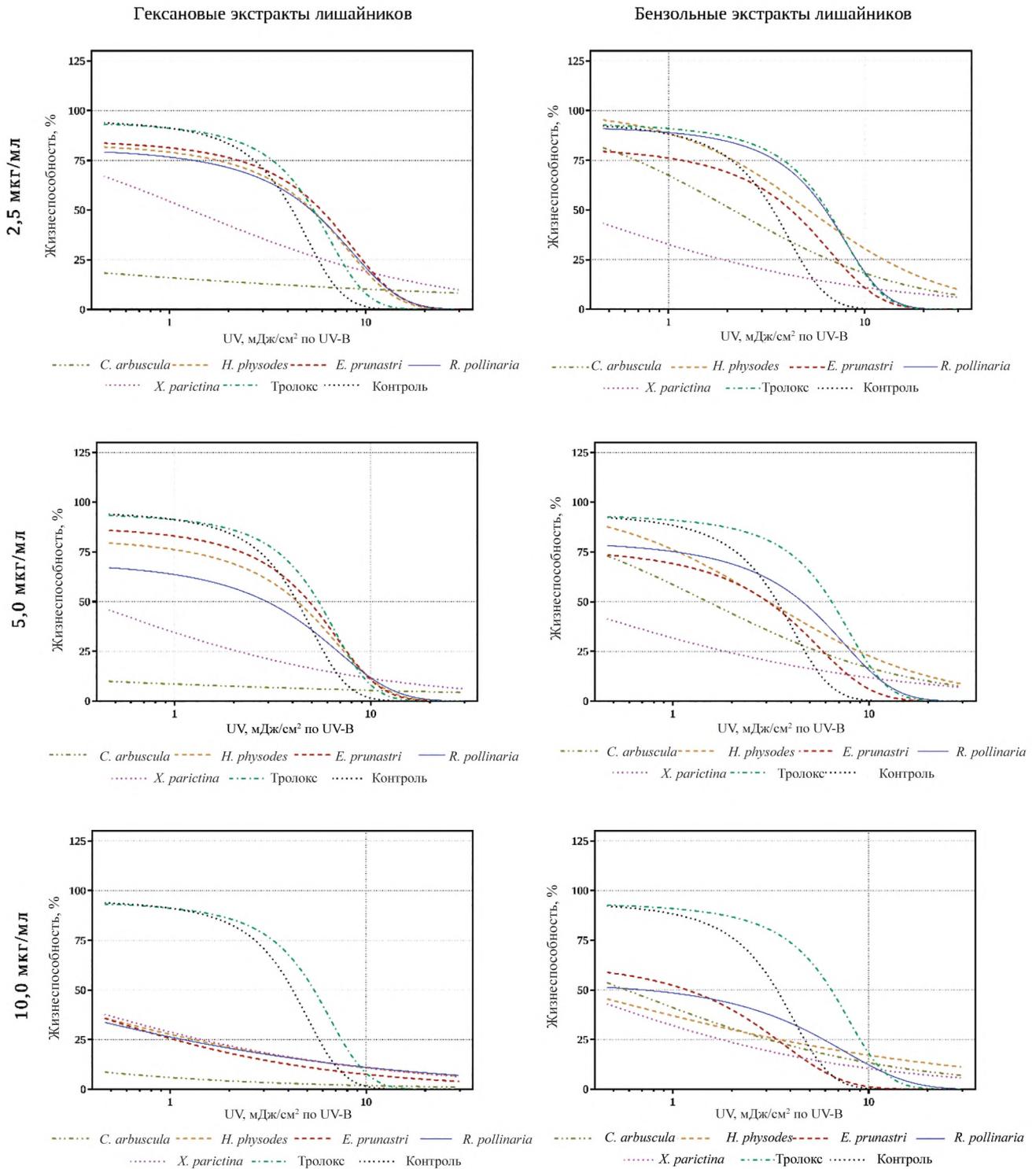


Рис. 2. Влияние дозы ультрафиолета и экстрактов лишайников на жизнеспособность кератиноцитов человека (HaCAT)

Fig. 2. Ultraviolet dose and lichen extracts concentration influence on the human keratinocyte (HaCAT) viability

Присутствие гексановых экстрактов *H. physodes* и *R. pollinaria*, а также гексановых и бензольных экстрактов *E. prunastris* в концентрации 2,5 мкг/мл снижало жизнеспособность кератиноцитов в области низких доз ультрафиолета (1–3 мДж/см<sup>2</sup>), и повышало в области 4–20 мДж/см<sup>2</sup> по сравнению с контролем. При использовании бензольных экстрактов *H. physodes* жизнеспособность кератиноцитов не снижалась в диапазоне 1–3 мДж/см<sup>2</sup>, но существенно повышалась в области сублетальных доз ультрафиолета. Обращает на себя внимание сходство кривых снижения жизнеспособности кератиноцитов для бензольного экстракта *R. pollinaria* и Тролокса (2,5 мкг/мл). Гексановые и бензольные экстракты *C. arbuscula* и *X. parietina*

той же концентрации при дозах ультрафиолета до 10 мДж/см<sup>2</sup> существенно понижали жизнеспособность кератиноцитов, причем среди гексановых экстрактов *C. arbuscula* была активнее *X. parietina*, тогда как среди бензольных – пассивнее.

Увеличение концентрации гексановых и бензольных экстрактов *H. physodes*, *E. prunastri* и *R. pollinaria* в питательной среде до 5 мкг/мл приводило к возрастанию их фотосенсибилизирующей активности в области низких доз и снижению фотозащитного эффекта в области высоких. Гексановые и бензольные экстракты *C. arbuscula* и *X. parietina* в количестве 5 мкг/мл повышали чувствительность кератиноцитов к облучению на протяжении всего используемого диапазона доз ультрафиолета.

При концентрации 10 мкг/мл гексановые и бензольные экстракты *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* резко понижали жизнеспособность кератиноцитов даже при облучении их самими низкими экспериментальными дозами УФ, причем гексановые экстракты лишайников как фотосенсибилизаторы, были активнее бензольных.

Характер и количественные показатели модификации гексановыми и бензольными экстрактами лишайников чувствительности кератиноцитов к ультрафиолету чаще всего не похожи на таковые у модельного антиоксиданта, что косвенно подтверждает предположение об ином, не антиоксидантном механизме модификации эффекта облучения.

Таким образом, характер модификации действия ультрафиолета гексановыми и бензольными экстрактами лишайников *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* на культуры кератиноцитов человека зависит как от концентрации экстрактов, так и от дозы облучения. Фотопротектором является бензольный экстракт *R. pollinaria* в концентрации 2,5 мкг/мл. Фотосенсибилизаторами – гексановый экстракт *C. arbuscula* и бензольный экстракт *X. parietina*.

### Заключение

Выход гексановых экстрактов из воздушно-сухой биомассы лишайников *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* не превышает 2,0 %; выход бензольных экстрактов составляет 1,3÷2,5 % для *C. arbuscula* и *X. parietina*; 5,4÷5,8 % для *E. prunastri*, *H. physodes* и *R. pollinaria*. Гексановые и бензольные экстракты лишайников *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* не являются фотозащитными по показателям величин SPF и  $\lambda_{\text{крит}}$ .

Гексановые и бензольные экстракты лишайников *C. arbuscula*, *H. physodes* цитотоксичны в отношении культуры HaCAT.

Гексановые и бензольные экстракты лишайников *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* являются фотомодификаторами в отношении культур кератиноцитов человека. Выраженность фотомодифицирующего действия экстрактов лишайников зависит от их концентрации в питательной среде. При концентрации 10 мкг/мл гексановые и бензольные экстракты *C. arbuscula*, *E. prunastri*, *H. physodes*, *R. pollinaria* и *X. parietina* являются фотосенсибилизаторами, причем экстракты *C. arbuscula* и *X. parietina* увеличивают токсическое действие ультрафиолета в 10 и более раз, независимо от концентрации экстракта в питательной среде. Фотопротекторами, ослабляющими действие ультрафиолета в 1,6÷1,8 раз, являются гексановый экстракт *E. prunastri* и бензольные экстракты *R. pollinaria* и *H. physodes* в концентрации 2,5 мкг/мл.

При увеличении доз облучения кератиноцитов ультрафиолетом от нулевых до летальных значений бензольный экстракт *R. pollinaria* выступал фотопротектором при концентрации 2,5 мкг/мл и фотосенсибилизатором при более высоких концентрациях. Гексановые и бензольные экстракты *E. prunastri* и *H. physodes* проявляли сенсibilизационные свойства, возрастающие с увеличением концентрации экстрактов лишайников. Гексановый экстракт *C. arbuscula* и бензольный экстракт *X. parietina* в наибольшей степени подавляли жизнеспособность кератиноцитов.

### Библиографические ссылки

1. Lohézic-Le Dévéhata F, Legouin B, Couteau C, et al. Lichenic extracts and metabolites as UV filters. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2013;120:17–28. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2013.01.009.
2. Rancan F, Rosan S, Boehm K, et al. Protection against UVB irradiation by natural filters extracted from lichens. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2002;68 (2–3):133–139. DOI: 10.1016/S1011-1344(02)00362-7.
3. Radice M, Manfredini S, Ziosi P, et al. Herbal extracts, lichens and biomolecules as natural photo-protection alternatives to synthetic UV filters. A systematic review. *Fitoterapia*. 2016;144:144–162. DOI: 10.1016/j.fitote.2016.09.003.
4. Chiang H.-S, Wu W.-B, Fang J.-Y, et al. UVB-protective effects of isoflavone extracts from soybean cake in human keratinocytes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2007;8(7):651–661. DOI: 10.3390/i8070651.
5. Храменкова ОМ, Матвеевков МВ. Цитотоксическая активность экстрактов из четырех видов лишайников в отношении культур опухолевых клеток. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2018;2:88–98.

6. Храмченкова ОМ, Матвеевков МВ. Фотозащитная активность экстрактов из пяти видов лишайников в отношении кератиноцитов человека (HaCAT). *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2018;4:52–62.
7. Rojas JL, Díaz-Santos M, Valencia-Islas NA. Metabolites with antioxidant and photo-protective properties from *Usnea roccellina* Motyka, a lichen from Colombian Andes. *Journal of Pharmaceutical and Biosciences*. 2015;3(4):18–26. DOI: <http://dx.doi.org/10.20510/ukjpb/3/i4/89454>.
8. American Type Culture Collection [Internet]. [Cited 2018 August 18]; 2018. Available from: <https://www.atcc.org>.

## References

1. Lohézic-Le Dèvehata F, Legouin B, Couteau C, et al. Lichenic extracts and metabolites as UV filters. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2013;120:17–28. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2013.01.009.
2. Rancan F, Rosan S, Boehm K, et al. Protection against UVB irradiation by natural filters extracted from lichens. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2002;68 (2–3):133–139. DOI: 10.1016/S1011-1344(02)00362-7.
3. Radice M, Manfredini S, Ziosi P, et al. Herbal extracts, lichens and biomolecules as natural photo-protection alternatives to synthetic UV filters. A systematic review. *Fitoterapia*. 2016;144:144–162. DOI: 10.1016/j.fitote.2016.09.003.
4. Chiang H.-S, Wu W.-B, Fang J.-Y, et al. UVB-protective effects of isoflavone extracts from soybean cake in human keratinocytes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2007;8(7):651–661. DOI: 10.3390/i8070651.
5. Khranchankova VM, Matveyenkau MV. *Tsitologicheskaja aktivnost ekstraktov iz chetyrekh vidov lishainikov v otnoshenii kultur opuholevykh kletok*. [Cytotoxic activity of extracts from the four lichen species against human cancer cells lines]. *Journal Belarusian State University. Ecology*. 2018;2:88–98. Russian
6. Khranchankova VM, Matveyenkau MV. *Fotozashchitnaja aktivnost ekstraktov iz piati vidov lishainikov v otnoshenii keratinotsitov cheloveka (NaSAT)*. [Photoprotective activity of extracts from the five lichen species against human keratinocyte (HaCAT)]. *Journal Belarusian State University. Ecology*. 2018;4:52–62. Russian
7. Rojas JL, Díaz-Santos M, Valencia-Islas NA. Metabolites with antioxidant and photo-protective properties from *Usnea roccellina* Motyka, a lichen from Colombian Andes. *Journal of Pharmaceutical and Biosciences*. 2015;3(4):18–26. DOI: <http://dx.doi.org/10.20510/ukjpb/3/i4/89454>.
8. American Type Culture Collection [Internet]. [Cited 2018 August 18]; 2018. Available from: <https://www.atcc.org>.

Статья поступила в редколлегию 15.01.2021.  
Received by editorial board 15.01.2021.

УДК [581.5+581.1]:504

## ВЛИЯНИЕ УРБОСРЕДЫ НА НЕКОТОРЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ ТУИ ЗАПАДНОЙ (*THUJA OCCIDENTALIS*) В УСЛОВИЯХ Г. МИНСКА

Р. С. БОНДАРУК<sup>1)</sup>

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

Городская среда отличается своеобразием экологических процессов, специфичностью техногенных воздействий, приводящих к значительной трансформации окружающей среды. Растения являются основным фактором экологической стабилизации городской среды благодаря своей жизнедеятельности, фотосинтезу и способности к аккумуляции загрязняющих веществ. В связи с этим представляется актуальным изучение резистентности различных видов растений к городским условиям. Оценка экологической пластичности растений и определение их адаптивного потенциала позволяет решать разнообразные экологические и практические задачи. В процессе изучения влияния урбанизированной среды на примере г. Минска на некоторые физиологические показатели растений туи западной установлено, что изменение клеточного метаболизма проявляется в увеличении проницаемости клеточных мембран, изменении водного обмена растений, увеличении на 35 % активности пероксидазы и снижении более чем в 1,6 раза активности каталазы. В крупных городах складывается особый температурный режим, характеризующийся повышенными температурами, что влияет на продолжительность вегетационного периода растений. Важное экологическое значение для растений имеет понижение относительной влажности воздуха в городе, что особенно заметно в летний период. В городских условиях наблюдается нивелирование ветров, усиление турбулентности воздушных потоков, связанных с планировочными особенностями городской застройки и приводящими к скоплению вредных атмосферных примесей. Задымление и запыленность воздуха в условиях мегаполиса задерживают до 20 % солнечной радиации, оказывающей неблагоприятное влияние на жизнедеятельность растений. Городская среда характеризуется особенностями светового режима, который нарушает естественные биологические ритмы. Сильной трансформации подвергаются почвы, испытывающие комплексное антропогенное воздействие. Уплотненность и загрязненность почвы, наличие асфальтового покрытия отрицательно воздействуют на температурный режим, воздухо- и водообмен почв и, как следствие, на состояние растительности.

**Ключевые слова:** городская среда; каталаза; пероксидаза; проницаемость клеточных мембран; водный обмен.

## THE IMPACT OF THE URBANIZED ENVIRONMENT ON THE EXAMPLE ON SOME PHYSIOLOGICAL INDICATORS (*THUJA OCCIDENTALIS*) OF THE CITY OF MINSK

R. S. BONDARUK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,  
23/1 Dauhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

### Образец цитирования:

Бондарук Р.С. Влияние урбосреды на некоторые показатели растений туи западной (*Thuja occidentalis*) в условиях г. Минска. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;2:36–43.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-36-43>

### For citation:

Bondaruk R.S. The impact of the urbanized environment on the example on some physiological indicators (*Thuja occidentalis*) of the city of Minsk. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;2:36–43. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-36-43>

### Автор:

**Роман Сергеевич Бондарук** – магистр биологических наук, аспирант кафедры общей биологии и генетики.

### Author:

**Roman S. Bondaruk**, master of biological sciences, postgraduate student at the department of general biology and genetics.  
[mikheyeva@tut.by](mailto:mikheyeva@tut.by)

In large cities a special temperature condition is formed, which is characterized by the increased temperatures that affects the duration of the growing season of plants. A decrease in the relative humidity of the air in the city is of great ecological importance for plants; this is especially noticeable in the summer. In urban conditions, a leveling of winds and the increased turbulence of air flows, which is associated with the planning features of urban development, lead to the accumulation of harmful atmospheric impurities. Smoke and dust content of the air in urban conditions retain up to 20 % of solar radiation, which has an adverse effect on the vital activity of plants. The urban environment is characterized by the features of the light regime, which disrupts the natural biological rhythms. In cities, the soils are exposed by a strong transformation and go through a complex anthropogenic impact. Compaction and contamination of the soil as well as asphalt coating negatively affect the temperature conditions, air and water exchange of the soils, and, as a result, the state of vegetation. The urban environment is distinguished by the originality of environmental factors, the specificity of technogenic impacts, leading to a significant transformation of the environment. Plants are the main factor in the ecological stabilization of the urban environment due to their vital activity, photosynthesis and the ability to accumulate pollutants. In this regard, it seems relevant to study the resistance of various plant species to urban conditions. Assessment of the ecological plasticity of plants and determination of their adaptive potential allows solving various ecological and practical problems. In the process of studying the influence of the urbanized environment on the example of the city of Minsk on some physiological indicators of *Thuja occidentalis* plants, it was found that a change in cellular metabolism manifests itself in an increase in the permeability of cell membranes, a change in water metabolism of plants, an increase in peroxidase activity by 35% and a decrease in catalase activity by more than 1,6 times.

**Keywords:** urban environment; catalase; peroxidase; permeability of cell membranes; water exchange.

## Введение

Городская среда отличается своеобразием экологических процессов, специфичностью техногенных воздействий, приводящих к значительной трансформации окружающей среды. Растения хотя и подвергаются комплексному химическому, физическому, биогенному воздействию вследствие загрязнения атмосферы, поверхностных и грунтовых вод, но, тем не менее, остаются основным фактором экологической стабилизации городской среды благодаря своей жизнедеятельности, прежде всего, фотосинтезу и способности к аккумуляции загрязняющих веществ [1; 2]. В крупных городах складывается особый температурный режим, характеризующийся повышенными температурами. Его формирование обусловлено усиленным притоком антропогенного тепла (работа промышленных предприятий, транспорт, отопительные системы жилых массивов, а также дополнительные источники теплового излучения – искусственные покрытия улиц и площадей, крыши и стены зданий). По этой причине температура воздуха в городе в среднем на 0,5–5 °С выше по сравнению с пригородной зоной, а безморозный период продолжительнее на несколько дней [3–5].

Важное экологическое значение для растений имеет понижение относительной влажности воздуха в городе, это особенно заметно в летний период, когда разница между городом и пригородом по этому показателю достигает 7–15, а в центре – 20–22 %. Большая концентрация ядер конденсации в атмосфере над городом приводит к повышенной облачности и увеличению частоты выпадения осадков примерно на 10–15 % [6].

В городских условиях наблюдается нивелирование ветров, усиление турбулентности воздушных потоков, что связано с орографическими неровностями и планировочными особенностями городской застройки. Наличие своеобразного «острова тепла» над центром города вызывает образование системы ветров, дующих от периферии к центру. Это приводит к ослаблению вентилируемости его центральных районов и скоплению вредных атмосферных примесей [7; 8].

Задымление и запыленность воздуха, частая повторяемость туманов задерживают 18–20 % солнечной радиации (в сильно загрязненных районах – до 50 %, для коротковолновой ультрафиолетовой радиации – до 80 %). Ослабление наиболее активной в биологическом отношении радиации оказывает неблагоприятное влияние на жизнедеятельность растений. Несмотря на то что в районах с многоэтажной застройкой растения нередко испытывают недостаток света из-за прямого затенения, особенностью светового режима в урбаноэкосистемах является дополнительное освещение улиц, искусственно продлевающее световой день, которое не влияет на процессы фотосинтеза (из-за низкой интенсивности), но сказывается на фотопериодических реакциях растений и нарушает естественные биологические ритмы поведения насекомых-фитофагов, вызывая их перераспределение и скопление в отдельных частях насаждений [9].

В городах сильной трансформации подвергаются почвы, испытывающие комплексное антропогенное воздействие. Естественные почвы часто оказываются погребенными под слоем насыпного грунта, в том числе с примесью строительного мусора, и на его профиле с трудом выделяются горизонты. Уплотненность и загрязненность урбаноземов, наличие асфальтового покрытия отрицательно воздействуют на температурный режим, воздухо- и водообмен почв, состояние почвенной микрофлоры, мезофауны и, как следствие, состояние растительности. В результате угнетается рост деревьев, появляются признаки суховершинности, происходит частичное или полное исчезновение травянистого покрова. Внесение противогололедных

реагентов вызывает в городских условиях засоление и способствует формированию условий «физиологической» сухости для растений [10].

Вследствие высокой теплопроводности асфальтового покрытия годовой перепад температур в корнеобитаемых горизонтах почв в городах составляет 40 °С (в естественных условиях не более 20–25 °С). В результате летом почва под асфальтом перегревается и иногда достигает 50–55 °С, а зимой сильно промерзает (до -10–13 °С). В итоге верхние слои почв не содержат живых корней [11].

Ежегодная уборка опавшей листвы, скашивание газонных трав изменяют элементный состав грунта, что может привести к размыканию естественных биогеохимических циклов. Кроме того, происходит подщелачивание городских почв, снижающее доступность элементов питания. Плодородие во многом определяется деятельностью почвенной микрофлоры и мезофауны, но по причинам, указанным ранее, городские почвы практически стерильны почти до метровой глубины [12].

Содержание органического углерода в почвах крупных промышленных центров обуславливается не только сугубо почвенными процессами, но и оседающей пылью, включающей углеродосодержащие соединения промышленных и транспортных выбросов. Такой органический углерод не имеет прямого отношения к гумусу и не может служить показателем плодородия почв. Таким образом, в крупных промышленных городах происходит значительное увеличение антропогенной нагрузки на урбанизированные экосистемы. В этих условиях важным свойством живых организмов является способность сочетать устойчивость (гомеостаз) и приспособления (адаптации) к изменяющимся условиям среды, что дает возможность выжить в условиях нарастающего антропогенного стресса [13].

Значительную роль в создании благоприятной для людей среды обитания играют древесные растения. В городских ландшафтах они выполняют важнейшие средообразующие и средозащитные функции, связанные с выделением кислорода и фитонцидов, ионизацией воздуха, формированием своеобразного микроклимата [14].

В то же время насаждения, произрастающие на урбанизированных территориях, испытывают на себе постоянное влияние техногенного загрязнения. В связи с этим большое значение приобретает проблема изучения резистентности различных видов растений к городским условиям. Оценка экологической пластичности растений и определение их адаптивного потенциала позволяет решать разнообразные экологические и прикладные задачи, а также прогнозировать поведение видов при климатических изменениях и антропогенных воздействиях.

Особую ценность в улучшении качества городской среды представляют хвойные растения. Большинство из них являются вечнозелеными, что повышает их роль в озеленении городов, расположенных особенно в зоне умеренного климата, так как они участвуют в очистке воздуха от пыли и вредных газов даже в зимнее время.

Использование хвойных растений в озеленении городов зачастую затруднено из-за их высокой чувствительности к ряду загрязняющих веществ, что определяется преимущественно значительной продолжительностью жизни хвои. Но все же некоторые виды хвойных отличаются значительной устойчивостью к техногенному загрязнению. Среди них можно отметить виды рода туя (*Thuja* L.), которые не только обладают высокими декоративными качествами, но и по сравнению с другими хвойными растениями способны максимально противостоять действию токсичных газов.

Таким образом, изучение эколого-биологических особенностей видов рода туя в городских районах с различной антропогенной нагрузкой позволит провести оценку перспективности применения его форм и сортов для улучшения качества окружающей среды. В связи с этим целью наших исследований было изучение некоторых физиологических показателей растений туи западной, произрастающих в условиях г. Минска.

### Материалы и методы исследования

Объект исследований – насаждения туи западной (сорта и формы) в составе зеленых насаждений в различных (с точки зрения экологических условий) р-нах г. Минска. В качестве зон условного контроля в г. Минске были выбраны: территория Центрального Ботанического сада НАН Беларуси, Лошицкого парка, улицы, парки и скверы Партизанского р-на. В качестве критериев стрессоустойчивости к неблагоприятным экологическим факторам городской среды оценивали такие физиологические показатели, как водоудерживающая и водопоглощающая способность, а также активность пероксидазы и каталазы.

Для проведения исследований физиологических показателей клеток растений *T. occidentalis* проводили сбор образцов побегов и хвои. Образцы отбирали из средней части кроны с южной стороны. Выборка в каждом местообитании составляла 10 растений. Определение активности фермента пероксидазы проводили фотоэлектроколориметрическим методом. Для этого навеску растительного материала растирали в ступке с дистиллированной водой, вытяжку настаивали, фильтровали. Надосадочную жидкость использовали для определения пероксидазной активности, для чего в кювету помещали бензидин, анализируемую жидкость

и вливали перекись водорода, при этом отмечали время, за которое стрелка гальванометра достигала 0,2 единиц оптической плотности. Активность фермента рассчитывали по значению оптической плотности исследуемой жидкости при длине волны 670 нм, деленному на грамм сырой массы за секунду ( $\Delta D_{670} \text{г}^{-1} \text{с}^{-1}$ ) [15].

Активность фермента каталазы определяли титриметрическим методом. При этом отфильтрованный гомогенат инкубировали в течение 10 мин с раствором перекиси водорода. Инкубацию прекращали, добавляя 5 мл 10 % серной кислоты. Неразложившуюся перекись водорода инактивировали 0,05 н раствором перманганата калия до появления слаборозовой окраски, не исчезающей в течение минуты. Активность каталазы выражали количеством перекиси водорода, разложившейся в результате действия фермента за 1 мин на 1 г сырой массы ( $\text{млH}_2\text{O}_2 \text{мин}^{-1} \text{г}^{-1}$ ) [15].

Водоудерживающую способность тканей устанавливали методом подсушивания, проводимым в эксикаторе над насыщенным раствором хлорида натрия. Проницаемость мембран определяли кондуктометрическим методом. Для этого готовили вытяжку растительной ткани, измеряли величину ее электропроводности, по которой судили о выходе электролитов. В работе использовали следующие статистические характеристики: среднее арифметическое, ошибка среднего арифметического, минимальные и максимальные значения в выборке, коэффициент корреляции, *t*-критерий Стьюдента с поправкой Бонферони. При изучении физиологических показателей растений, произрастающих в различных районах города, применялись одно- и двухфакторный дисперсионный анализ, множественные сравнения. Экспериментальные данные, полученные в результате проведенных исследований, обрабатывали с помощью программ «Statistica».

### Результаты исследований и их обсуждение

Одним из важнейших показателей жизнеспособности растений является степень оводненности их тканей. Содержание и состояние воды в клетках и тканях влияют на устойчивость растений к неблагоприятным факторам внешней среды и, в конечном счете, на рост и продуктивность. Известно, что влажность тканей значительно изменяется в течение года, а величина содержания общей воды (общая оводненность) используется как интегральный показатель эколого-физиологических особенностей водного режима растений, механизмов их адаптации к условиям среды. В связи с этим в 2018–2020 гг. нами была прослежена сезонная динамика водоудерживающей способности тканей растений *T. occidentalis* в районах г. Минска с различным уровнем загрязнения атмосферного воздуха.

Как показали результаты, значения данного показателя изменяются в зависимости от сезона. Самые низкие значения водоудерживающей способности тканей побегов *T. occidentalis*, произрастающих в экологически чистом районе города (ЦБС НАН Беларуси), были отмечены в весенние месяцы, а потери воды при этом были наибольшими и составили 11,5 %. Высокая водоудерживающая способность была обнаружена в октябре–ноябре, так как потери воды были незначительны и равнялись всего 3,0–3,4 %. Известно, что весной, с началом роста побегов происходят активные метаболические процессы, сопровождающиеся высокой интенсивностью аэробного дыхания и высокой активностью АТФ-азы. Эти процессы идут в условиях повышенного содержания свободной воды и низкой водоудерживающей способности тканей.

Установлено, что значения водоудерживающей способности растительных тканей у *T. occidentalis* в июне–августе варьировали от 7,3 до 10,7 %. Такое изменение водоудерживающей способности тканей побегов у туи в июне–августе, по-видимому, является адаптивным механизмом к изменениям температуры и влажности атмосферного воздуха в летние месяцы. Увеличение же значений данного показателя в осенние месяцы было вполне закономерно и соответствовало периоду подготовки растений к зимнему сезону. Побеги туи западной, произрастающей в районах с интенсивным антропогенным воздействием (район Минского тракторного завода), характеризовались более широким диапазоном колебаний значений потери воды при высушивании (от 2 до 14 %).

Анализ сезонных изменений водоудерживающей способности побегов *T. occidentalis*, произрастающих вблизи автомагистралей Партизанского р-на г. Минска, свидетельствует, что по сравнению с контрольным местообитанием имеются некоторые отличия. Так, в апреле растения, произрастающие в районах с низким (ЦБС НАН Беларуси) и средним (Лошицкий парк) уровнем загрязнения, характеризовались значительным снижением водоудерживающей способности тканей, при этом потеря воды тканями составляла от 8,2 до 15,5 %. В мае изученные показатели находились на одном уровне с контролем (ЦБС НАН Беларуси) – 10–12 %. В июне же потери воды побегами туи западной были выше на 35 %, чем в ЦБС НАН Беларуси. В июле–августе изученные растения не имели статистически значимых различий.

В ноябре, когда в контрольном варианте потери воды снижались, в побегах *T. occidentalis* произрастающих в районах, подверженных антропогенному загрязнению, было отмечено понижение водоудерживающей способности тканей в 1,2–1,4 раза. Таким образом, при снижении значений данного показателя в побегах растений *T. occidentalis* в районе промышленных предприятий наблюдалось увеличение водоудерживающей способности у растений данного вида в экологически чистом районе города. Аналогичная картина отмечена

нами и в июне. В ходе исследований просматривались два четко выраженных направления в водном обмене у туи западной: весенне-летнее, когда потери воды были максимальными и составляли 7,3–15,6 %, и осенне-зимнее – с более стабильными параметрами водного режима и высокой водоудерживающей способностью тканей (потери воды равнялись 2,2–8,7 %). По всей видимости, это связано с тем, что летом ткани растений физиологически более активны, а зимой находятся в состоянии покоя, поэтому потеря воды (метаболической, транспортной, обменной и др.) в летние месяцы больше, чем зимой.

Однако установлено, что растения *T. occidentalis*, произрастающие в местообитаниях с большей антропогенной нагрузкой, характеризуются более существенными колебаниями водоудерживающей способности в течение года. Вероятно, на водный обмен туи западной в более загрязненных районах города оказывают влияние различные загрязняющие вещества, находящиеся в атмосфере.

Так как водоудерживающую способность, определенную методом высушивания, принято считать показателем экологической пластичности вида, то можно предположить, что значительные колебания данного признака (от 2,26 до 15,6 %) у *T. occidentalis* в различных местообитаниях, находящихся в одном возрастном состоянии (g) и на одном уровне жизненности (здоровые растения), могут свидетельствовать о высоких адаптивных способностях этого вида к условиям окружающей среды.

Основные функции клеточных мембран заключаются в отделении содержимого клетки от внешней среды, в создании ее внутренней архитектуры, поддержании градиента концентраций и электрохимического градиента, осуществлении транспорта веществ. Благодаря регуляторным свойствам биомембран растения в значительной мере контролируют свой водный режим, минеральное питание и взаимодействие. Наличие эндомембранной системы, указывающее на существование регуляторных взаимодействий клеточных органелл, обеспечивает системный ответ клетки на изменение условий внутренней и внешней среды. Начальные этапы реакции клеток на действие различных стрессоров связывают с изменением состояния мембран и деградацией липидов [16; 17].

Содержащиеся в атмосфере газообразные вещества проникают в межклетники растений через устьица, далее они растворяются в воде, пропитывающей целлюлозные оболочки клеток, и на пути в клетку вступают в контакт с клеточной мембраной. Многие промышленные газообразные соединения обладают свойствами сильных окислителей, поэтому они, адсорбируясь на поверхности мембраны и проникая через нее, могут вызывать окислительное разрушение. Кроме того, изменение проницаемости клеточных мембран для электролитов является одной из ранних реакций растительной клетки на экстремальные воздействия различной этиологии (низкие и высокие температуры, засуха, засоление, инфекции, наличие тяжелых металлов и др.), что приводит к ускорению выхода из клетки минеральных и органических ионов и потере воды.

Таким образом, для устойчивости растений к стрессовым факторам внешней среды важно сохранение целостности мембран, поэтому проницаемость клеточных мембран для электролитов – интегральный показатель функционального состояния растительных тканей, свидетельствующий о их выносливости и стабильности в неблагоприятных условиях произрастания.

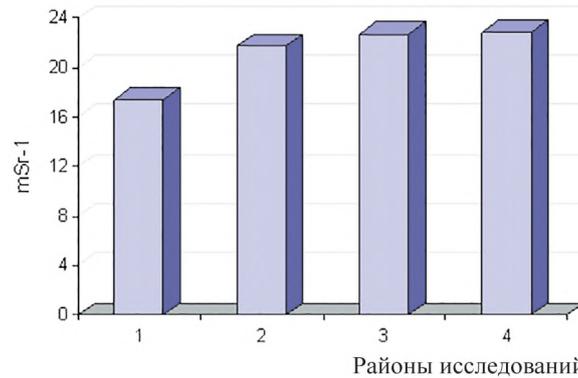
Результаты наших исследований свидетельствуют, что минимальная электропроводность раствора –  $17,42 \text{ mSr}^{-1}$  – была обнаружена в тканях растений *T. occidentalis*, произраставших в более чистом местообитании – ЦБС НАН Беларуси (см. рисунок).

Растения *T. occidentalis* из местообитаний с более высокой антропогенной нагрузкой характеризовались увеличением удельной электропроводности раствора практически в 1,3 раза, то есть эти параметры были равны  $21,7\text{--}22,8 \text{ mSr}^{-1}$ . Попарное сравнение значений удельной электропроводности исследуемых растворов (t-критерий Стьюдента) показало, что значение проницаемости клеточных мембран побегов растений *T. occidentalis*, произраставших в ЦБС НАН Беларуси, было достоверно ниже, чем у растений, произраставших в промышленной зоне города (при  $p < 0,05$ ). Установлено, что группы растений *T. occidentalis*, произраставшие в Лошицком парке и в микрорайоне МТЗ, по значениям проницаемости клеточных мембран достоверно не отличались друг от друга.

Наиболее часто при изучении устойчивости растений к неблагоприятным факторам среды учитывается активность некоторых антиоксидантных ферментов. Поддержание равновесия окислительно-восстановительных процессов в клетках при действии газообразных соединений, особенно кислотогенных, имеет особое значение, так как последние вызывают сдвиг межклеточной и внутриклеточной среды в кислую сторону. Поскольку оптимумы действия большинства гидролитических ферментов находятся в кислой зоне, падение pH клеточной среды способствует их активации, что в дальнейшем может привести к усилению окислительных процессов в клетках.

Механизм токсического действия газообразных кислотных оксидов на растения заключается в неспецифическом повреждении деятельности многих ферментов в клетках вследствие подкисления и нарушения ионного режима, метаболизма и накопления балластных и, возможно, токсических продуктов, в разрушении фотосинтетических структур, в нарушении электронно-транспортных путей, в миграции энергии от пигментов к центрам их использования, в уменьшении использования световой энергии на

восстановительные процессы и появлении автокаталитических цепных реакций свободнорадикального фотодинамического окисления. Летальные концентрации кислых газов вызывают быструю инактивацию многих ферментов и фиксацию клеток без разрушения пигментов вследствие чисто химического отравления, гидролиза и окислительного распада важных биологических белковых структур клетки.



Проницаемость клеточных мембран в побегах *T. Occidentalis*: 1 – ЦБС НАН Беларуси, 2 – Лопицкий парк, 3 – микрорайон МТЗ

Permeability of cell membranes in shoots of *T. Occidentalis*:

1 – Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, 2 – Loshitskiy Park, 3 – MTZ microdistrict

При негативных воздействиях в клетках растений усиливается образование активных форм кислорода, что в итоге может привести к окислительному стрессу. Перекись водорода способна легко диффундировать через мембраны из мест образования (хлоропласты, митохондрии) в клеточную стенку, где она используется для катализируемого пероксидазами образования перекисных связей в структурных белках и пектинах. Образование и быструю диффузию через мембраны перекиси водорода рассматривают как проявление сигнальной функции и вторичный мессенджер при трансдукции стрессорного сигнала, включающего индукцию синтеза ферментов-антиоксидантов.

Под влиянием неблагоприятных воздействий среды происходит активирование пероксидазы – одного из ключевых ферментов в формировании и развитии защитных реакций в растительной клетке, обеспечивающего нормальный ход окислительных процессов. Газообразные соединения на свету инициируют возникновение свободнорадикальных цепных реакций окисления, в ходе которых образуются органические перекиси. Образование и накопление последних, видимо, обуславливает субстратную активацию пероксидазы, которая, как известно, при каталитическом действии может использовать органические перекиси в качестве источника активного кислорода. Известно, что с повышением активности пероксидазы усиливаются ее оксидазные свойства, следовательно, в условиях действия CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> может преобладать функционирование пероксидазы как терминальной оксидазы. Таким образом, в этих условиях при ингибировании других оксидаз происходит адаптивная перестройка окислительного аппарата, препятствующая нарушению дыхательного процесса.

Защитные функции от окислительного эффекта перекиси водорода в клетке выполняет не только пероксидаза, но и другой антиоксидантный фермент – каталаза. Она катализирует реакцию разложения перекиси водорода на воду и молекулярный кислород. Каталаза проявляет умеренную пероксидазную активность, то есть катализирует реакции окисления перекисью водорода различных доноров электронов, среди которых этанол и др. Каталаза в растительной клетке в основном локализована в митохондриях и пероксисомах. Кроме того, ее активность обнаружена в хлоропластах. Каталаза инактивируется синильной кислотой, сероводородом, фторидами. Наиболее сильное торможение активности каталазы вызывает нитрат-ион. Данный фермент всегда присутствует в системах, где происходят процессы дыхания с участием цитохромов, то есть в тех случаях, когда образуется токсичная для клетки перекись водорода.

Так как пероксидаза и каталаза являются наиболее чувствительными ферментами при воздействии на растения неблагоприятных факторов среды, было проведено изучение их активности в побегах растений туи западной, произраставших в различных районах г. Минска. В ходе исследования было установлено, что в побегах *T. occidentalis*, произраставших в ЦБС НАН Беларуси, активность пероксидазы составляла около 6,6 ед. измерения ( $\Delta D_{670} \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ), в Лопицком парке значения данного показателя равнялись 6,8 ед. изм. Максимальная активность пероксидазы обнаружена у растений туи западной, произраставших в микрорайоне МТЗ – 8,9 ед. изм. Следовательно, достоверное увеличение активности пероксидазы связано с воздействием на растения загрязняющих веществ, содержащихся в атмосферном воздухе.

При изучении активности фермента каталазы у растений туи западной было установлено, что в противоположность пероксидазе данный фермент в неблагоприятных условиях снижает свою активность. Так, если в побегах растений *T. occidentalis*, произрастающих в ЦБС НАН Беларуси, каталазная активность

составляла 2,9 ед. изм. ( $\text{млН}_2\text{О}_2\text{мин}^{-1}\cdot\text{г}^{-1}$ ), то у растений микрорайона МТЗ значения данного показателя были статистически значимо ниже – 1,8 ед.изм. Уровень активности каталазы в побегах туи западной, произрастающей в Лошицком парке, составил 2,0 ед. изм.

### Заключение

Растения туи западной, произрастающие на урбанизированных территориях, испытывают негативное воздействие комплекса загрязняющих веществ, что приводит к изменению клеточного метаболизма. Изменение клеточного метаболизма у растений *T. occidentalis* проявляется в увеличении проницаемости клеточных мембран и изменении водного обмена растений.

В клетках и тканях растений *T. occidentalis* загрязнение атмосферного воздуха способствует увеличению на 35 % активности пероксидазы и снижению более чем в 1,6 раза активности каталазы.

### Библиографические ссылки

1. Бояркин АН. Быстрый метод определения активности пероксидазы. *Биохимия*. 1951;16(4):73–77.
2. Бухарина ИЛ, Поварнищина ТМ, Ведерников КЕ. *Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде*. Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА; 2007. 216 с.
3. Герасимов АО. *Устойчивость хвойных пород в уличных посадках Санкт-Петербурга*. Санкт-Петербург: Наука; 2003. 181 с.
4. Горышина ТК. *Растение в городской среде*. Ленинград: Издательство Ленинградского университета; 1991. 152 с.
5. Калашникова ОВ. *Техногенное загрязнение почвы и состояние древесных растений в г. Москве*. Москва: МГУ; 2003. 21 с.
6. Карасев ВН, Карасева МА, Маторкин АА. Эколого-физиологическая диагностика состояния городских зеленых насаждений. В: *Глобальные проблемы национальной безопасности России в 21 веке. – Седьмые Вавиловские чтения*. Йошкар-Ола: МарГУ. 2003. Том 2. с. 201–203.
7. Крылова ЛН, Каменщикова ЛВ, Ефремова ЛП. Эколого-физиологическая диагностика состояния городских зеленых насаждений. В: *Диалог наук на рубеже XX–XXI веков и глобальные проблемы современности. Вавиловские чтения*. Йошкар-Ола: МарГУ; 1996. с. 318–320.
8. Кулагин ЮЗ. *Древесные растения и промышленная среда*. Москва: Наука; 1974. 124 с.
9. Лихачева ЭА, Тимофеев ДА, Жидков МП и др. *Город – экосистема*. Москва: ИГРАН; 1996. 336 с.
10. Михайлова ТА. *Эколого-физиологическое состояние лесов, загрязненных промышленными эмиссиями*. Иркутск: Глазковская типография; 1996. 20 с.
11. Негроров ОП, Жуков ДМ, Фирсова НВ. *Экологические основы оптимизации и управления городской средой. Экология города*. Воронеж: Издательство Воронежского университета; 2000. 271 с.
12. Сергейчик СА. Роль древесных растений в очищении атмосферного воздуха от газообразных сернистых токсикантов. В: *Проблемы фитогигиены и охрана окружающей среды*. Ленинград: Гидрометеоиздат; 1981. 133–136.
13. Хвастунов АИ. *Экологические проблемы малых и средних промышленных городов: оценка антропогенного воздействия*. Йошкар-Ола: МарГУ; 1999. 248 с.
14. Якушина ЭИ. Древесные растения в озеленении промышленных зон. *Бюллетень главного ботанического сада РАН*. 1992;165:176.
15. Воскресенская ОЛ, Сарбаева ЕВ. *Эколого-физиологические адаптации туи западной (Thuja occidentalis L.) в городских условиях*. Йошкар-Ола: МарГУ; 2006. 130 с.
16. Чиркова ТВ. Клеточные мембраны и устойчивость растений к стрессовым воздействиям. *Соросовский образовательный журнал*. 1997;9: 12–17.
17. Чиркова ТВ. *Физиологические основы устойчивости растений*. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского университета; 2002. 244 с.

### References

1. Boyarkin AN. A quick method for determining the activity of peroxidase. *Biokhimiya*. 1951;16(4):73–77. Russian.
2. Bukharina IL, Povarnitsina TM, Vedernikov KE. *Ekologo-biologicheskie osobenosti drevesnykh rasteniy v urbanizirovannoy srede* [Ecological and biological characteristics of woody plants in an urbanized environment]. Izhevsk: FGOU VPO Izhevskaya GSKhA, 2007. 216 p. Russian.
3. Gerasimov AO. *Ustoychivost' khvoynykh porod v ulichnykh posadkakh Sankt-Peterburga* [Sustainability of conifers in street plantings in Saint Petersburg]. Saint Petersburg: Nauka; 2003. 181 p. Russian.
4. Goryshina TK. *Rastenie v gorodskoy srede* [A plant in an urban environment]. Leningrad: Izdatelstvo Leningradskogo universiteta; 1991. 152 p. Russian.
5. Kalashnikova OV. *Tekhnogennoe zagryaznenie pochvy i sostoyanie drevesnykh rasteniy v g. Moskve*. [Technogenic soil pollution and the state of woody plants in Moscow]. Moscow: MGU; 2003. 21 p. Russian.
6. Karasev VN, Karaseva MA, Matorkin AA. *Ekologo-fiziologicheskaya diagnostika sostoyaniya gorodskikh zelenykh nasazhdeniy*. [Ecological and physiological diagnostics of the state of urban green spaces]. In: *Global'nye problemy natsional'noy bezopasnosti Rossii v 21 veke. – Sed'mye Vavilovskie chteniya*. [Global problems of Russia's national security in the 21<sup>st</sup> century. – 7<sup>th</sup> Vavilov Readings]. Yoshkar-Ola: MarGU; 2003. Part 2. p. 201–203. Russian.
7. Krylova LN, Kamenshchikova LV, Efremova LP. *Ekologo-fiziologicheskaya diagnostika sostoyaniya gorodskikh zelenykh nasazhdeniy* [Ecological and physiological diagnostics of the state of urban green spaces]. In: *Dialog nauk na rubezhe XX–XXI vekov i global'nye problemy sovremennosti. Vavilovskie chteniya* [Dialogue of sciences at the turn of XX–XXI centuries and global problems of our time. Vavilov readings]. Yoshkar-Ola: MarGU; 1996. p. 318–320. Russian.

8. Kulagin YuZ. *Drevesnye rasteniya i promyshlennaya sreda* [Woody plants and industrial environments]. Moscow: Nauka; 1974. 124 p. Russian.
9. Likhacheva EA, Timofeev DA, Zhidkov MP, i dr. *Gorod – ekosistema* [City – ecosystem]. Moscow: IGRAN; 1996. 336 p. Russian.
10. Mikhaylova TA. *Ekologo-fiziologicheskoe sostoyanie lesov, zagryaznennykh promyshlennymi emissiyami* [Ecological and physiological state of forests polluted by industrial emissions]. Irkutsk: Glazkovskaya tipografiya; 1996. 20 p. Russian.
11. Negrobov OP, Zhukov DM, Firsova NV. *Ekologicheskie osnovy optimizatsii i upravleniya gorodskoy sredoy. Ekologiya goroda* [Ecological bases of optimization and management of the urban environment. Ecology of the city]. Voronezh: Izdatelstvo Voronezhskogo universiteta; 2000. 271 p. Russian.
12. Sergeychik SA. *Rol' drevesnykh rasteniy v ochishchenii atmosfernogo vozdukha ot gazoobraznykh sernistykh toksikantov* [The role of woody plants in the purification of atmospheric air from gaseous sulfurous toxicants]. In: *Problemy fitogigieny i okhrana okruzhayushchey sredy* [Problems of phytohygiene and environmental protection]. Leningrad: Gidrometioizdat, 1981. p. 133–136. Russian.
13. Khvastunov AI. *Ekologicheskie problemy malykh i srednykh promyshlennykh gorodov: otsenka antropogennogo vozdeystviya* [Environmental problems of small and medium-sized industrial cities: assessment of anthropogenic impact]. Yoshkar-Ola: MarGU, 1999. 248 p. Russian.
14. Yakushina EI. *Drevesnye rasteniya v ozelenenii promyshlennykh zon* [Woody plants in industrial landscaping]. *Byulleten glavnogo botanicheskogo sada RAN* [bulletin chapter of the Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences]. 1992;165:176. Russian.
15. Voskresenskaya OL, Sarbaeva EV. *Ekologo-fiziologicheskie adaptatsii tui zapadnoy (Thuja occidentalis L.) v gorodskikh usloviyakh* [Ecological and physiological adaptations of western thuja (*Thuja occidentalis* L.) in urban conditions]. Yoshkar-Ola: MarGU; 2006. 130 p. Russian.
16. Chirkova TV. *Kletochnye membrany i ustoychivost' rasteniy k stressovym vozdeystviyam*. [Cell membranes and plant resistance to stress]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*. 1997;9:12–17. Russian.
17. Chirkova TV. *Fiziologicheskie osnovy ustoychivosti rasteniy* [Physiological foundations of plant resistance]. Saint Petersburg: Izdatelstvo Sankt-Peterburgskogo universiteta; 2002. 244 p. Russian.

*Статья поступила в редколлегию 21.02.2021.*  
*Received by editorial board 21.02.2021.*

---

---

# РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

---

## RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

---

---

УДК 550.835.232:004.032.26

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ СПЕКТРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ $^{137}\text{Cs}$

А. Н. НИКИТИН<sup>1)</sup>, Е. В. МИЩЕНКО<sup>1)</sup>, О. А. ШУРАНКОВА<sup>1)</sup>

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

Развитие методов машинного обучения для обработки спектрограмм является одним из наиболее перспективных направлений автоматизации и повышения точности  $\gamma$ -спектрометрических измерений. В работе оценена эффективность использования полносвязных и сверточных нейронных сетей для количественного  $\gamma$ -спектрометрического анализа при выполнении измерений с использованием сцинтилляционного NaI(Tl) детектора и свинцовой защиты. Для обучения моделей применялись полусинтетические спектры, представляющие собой поканальную сумму случайно отобранных реальных спектров с короткой продолжительностью измерений. Выполненный анализ показал преимущества искусственных нейронных сетей по сравнению со стандартным аналитическим методом обработки спектра. В зависимости от активности источника, среднеквадратичная ошибка измерения с использованием полносвязной нейронной сети оказалась в 2–4 раза ниже по сравнению со стандартным методом при времени измерения 100 с. В сильно стандартизированных условиях преимущества сверточных нейронных сетей проявляются с увеличением активности источника излучения. Валидация при помощи источников, не использованных при обучении нейронных сетей, показала, что нейронные сети могут иметь преимущества по сравнению со стандартным методом при относительно высокой активности.

---

#### Образец цитирования:

Никитин АН, Мищенко ЕВ, Шуранкова ОА. Оценка эффективности искусственных нейронных сетей для количественной обработки спектра гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$ . *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;2:44–54.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-44-54>

#### For citation:

Nikitin AN, Mischenko EV, Shurankova OA. Evaluation of artificial neural networks effectiveness for unfolding gamma-spectrum of  $^{137}\text{Cs}$ . *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;2:44–54. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-44-54>

---

#### Авторы:

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

**Егор Викторович Мищенко** – научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.

**Ольга Александровна Шуранкова** – научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.

#### Authors:

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

[nikitinale@gmail.com](mailto:nikitinale@gmail.com)

**Egor V. Mischenko**, researcher at the laboratory of radioecology.

[egormischenko@gmail.com](mailto:egormischenko@gmail.com)

**Olga A. Shurankova**, researcher at the laboratory of radioecology.

[shurankova@list.ru](mailto:shurankova@list.ru)

**Ключевые слова:** гамма-спектрометрия; искусственная нейронная сеть; полносвязная нейронная сеть; сверточная нейронная сеть; обработка спектра.

**Благодарность.** Исследования поддержаны грантом Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Ф20Р-319, а также Государственной программой научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда». Задание 3.05 НИР 4.

## EVALUATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS EFFECTIVENESS FOR UNFOLDING GAMMA-SPECTRUM OF $^{137}\text{CS}$

A. N. NIKITIN<sup>a</sup>, E. V. MISCHENKO<sup>a</sup>, O. A. SHURANKOVA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Radiobiology, National Academy of Sciences of Belarus,  
4 Fiadzuninskaga Street, 246007 Gomel, Belarus  
Corresponding author: Nikitin A. N. (nikitinale@gmail.com)*

Development of machine learning methods for spectrum processing is one of the most promising ways for gamma-spectrometry automation and accuracy improvement. Effectiveness of fully connected and convolution neural networks for quantitative  $\gamma$ -spectrometry analysis using scintillation detector NaI(Tl) and lead shielding is presented in the article. Semi-synthetic spectrums were used for the models training; the semi-synthetic spectrums are in channels additions of random spectrums measured at a short duration. The analysis shows advantages of artificial neural networks compare to the common analytical method of spectrum unfolding. The mean square error of activity evaluation is 2–4 times lower than the common method if measuring time is equal to 100 s. In highly standardized conditions of measuring, the advantages of convolution neural networks appear with increasing radiation source activity. Validation with sources not used in training of neural networks has shown fully connected and convolution neural networks can have advantages over the standard method when activity of  $\gamma$ -radiation source is relatively high.

**Keywords:** gamma-spectrometry; artificial neural network; fully connected neural network; convolution neural network; spectrum unfolding.

**Acknowledgments.** This study was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research grant F20R-319 and Belarussian state scientific research program «Natural Resources and Environment» (2021–2025) task 3.05.4.

### Введение

Гамма-спектрометрия является одним из центральных методов оценки загрязнения объектов окружающей среды радиоактивными изотопами. Она применяется также в ряде других областей: активационный неразрушающий анализ химического состава образцов, геологические исследования, контроль выгорания топлива в ядерном реакторе, эксперименты с радиоактивными метками, системы безопасности и др. Поиск подходов для повышения точности и надежности спектрометрических измерений является важной задачей прикладной радиометрии.

Методы  $\gamma$ -спектрометрии обладают довольно высокой чувствительностью, позволяющей количественно и качественно определять содержание изотопов радиоактивных элементов в образцах различного происхождения. Для подготовки заключения о содержании в образце тех или иных радиоизотопов, полученная от детектора спектрограмма должна пройти специальную обработку. Обычно такая обработка включает сглаживание спектра (избавление от статистических шумов), обнаружение пиков полного поглощения и качественная идентификация радиоизотопов на основании калибровки по энергии, очистка пика полного поглощения от шумов (вычитание фона), разделение сдвоенных пиков (при необходимости), оценка скорости счета в пике полного поглощения и расчет содержания радионуклида в образце на основании калибровки по эффективности. Каждая из процедур привносит свою ошибку в результат, величина которой определяется как особенностями спектрограммы, так и используемым методом обработки. Обработка спектра выполняется специалистом, имеющим специальную подготовку. В современных спектрометрических комплексах значительная часть операций выполняется автоматически с использованием вычислительных средств, но все еще требуется управление и контроль со стороны специалиста. Причем в сложных ситуациях от опыта оператора могут сильно зависеть результаты измерений.

Принципиально иным подходом к обработке спектрограмм является использование методов машинного обучения, в частности, искусственных нейронных сетей для качественного и/или количественного определения радиоизотопов в образцах, оценки изотопных отношений, качества полученного спектра,

выявления аномалий (в системах радиационной безопасности) и для других целей. Попытки использования искусственных нейронных сетей для анализа спектров ионизирующих излучений предпринимались на протяжении последних двух десятилетий [1–5]. В этих решениях использовались, как правило, однослойные искусственные нейронные сети. Широкого практического применения такие решения не нашли, поскольку эффективность их мало отличалась от работы оператора. Однако в связи с развитием методов глубокого обучения, применение искусственных нейронных сетей в спектрометрии ионизирующих излучений потенциально может дать новые результаты, достижение которых другими методами маловероятно. Подтверждением тому могут служить успехи в использовании глубоких нейронных сетей для отделения редких сигналов возникающих при распаде естественных радионуклидов на фоне шумов [6].

Перспективным направлением развития методов автоматизации  $\gamma$ -спектрометрии представляется использование сверточных нейронных сетей. Одномерные фильтры-свертки заданной ширины с обучаемыми картами признаков в многослойных сверточных нейронных сетях отлично подходят для одновременной обработки локальных элементов, к которым с полным основанием можно отнести пики спектра, а также крупномасштабные особенности спектра, включающие пик обратного рассеяния, комптоновское распределение, фоновые шумы и т. д. Основной гипотезой настоящего исследования является предположение о том, что подобный одновременный учет всех особенностей спектра с использованием нейронной сети позволит повысить точность измерения. Кроме того, использование нейронной сети должно повысить автономность измерительных систем и снизить зависимость качества измерений от подготовки оператора.

Целью настоящего исследования является анализ эффективности многослойных полносвязной и сверточной нейронных сетей для обработки спектра  $\gamma$ -излучения при количественном определении активности заданного радионуклида в стандартизированных условиях.

### Материалы и методы исследования

Анализ эффективности использования нейронных сетей проведен для сцинтилляционного детектора NaI(Tl) и точечного источника излучения  $^{137}\text{Cs}$  активностью 10 КБк. Для проведения работ сформирован набор полусинтетических спектров с различной виртуальной активностью точечного источника. Полусинтетические спектры сформированы путем сложения реальных спектров в присутствии и отсутствии (фон) точечного источника в различных пропорциях. Каждый полусинтетический спектр представляет собой сумму из 100 случайно отобранных реальных спектров, продолжительность которых 1 с (живое время). Всего использовано 17489 спектров фона и 14574 спектров в присутствии источника излучения. Доля спектров, полученных в присутствии источника, определяла виртуальную активность для данного полусинтетического спектра:

$$A = A_0 \frac{N_{src}}{N_{bkg} + N_{src}}, \quad (1)$$

где  $A$  – виртуальная активность источника полусинтетического спектра, Бк;  $A_0$  – активность источника, использованного при наборе спектров, Бк;  $N_{bkg}$  – количество спектров фона, использованных для синтеза спектра;  $N_{src}$  – количество спектров в присутствии источника излучения, использованных для синтеза спектров. Преимущества использования подобного подхода представлены в [7].

Для набора реальных спектров использован интеллектуальный блок детектирования BDKG-07 (SN:6387) производства Атомтех (Республика Беларусь) на основе детектора NaI(Tl) Ø63x63 мм, помещенный в свинцовую защиту. Блок детектирования подключался к компьютеру через блок сопряжения. Запись спектра осуществлялась в программе ATAS (Атомтех).

Описанным выше методом сформировано 10 тыс. полусинтетических спектров для тренировки моделей и 1000 спектров для их валидации. Примеры полусинтетических спектров приведены на рис. 1.

Обработка данных проведена с использованием языка Python и пакетов Pandas, Numpy, SciPy. Разработка нейронных сетей осуществлялась с использованием пакета PyTorch. В качестве меры точности обработки спектра использована среднеквадратичная ошибка между виртуальной активностью источника и результатами ее оценки разными методами.

### Результаты исследования и их обсуждение

В общем виде задача обработки спектра  $\gamma$ -излучения заключается в нахождении активности заданного радионуклида  $A_i$  по наблюдаемой скорости счета в совокупности каналов детектора  $N_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), где  $m$  – количество каналов детектора. При этом для каждого радионуклида характер отношения между  $N_i$  и  $A_i$  имеет свои особенности.

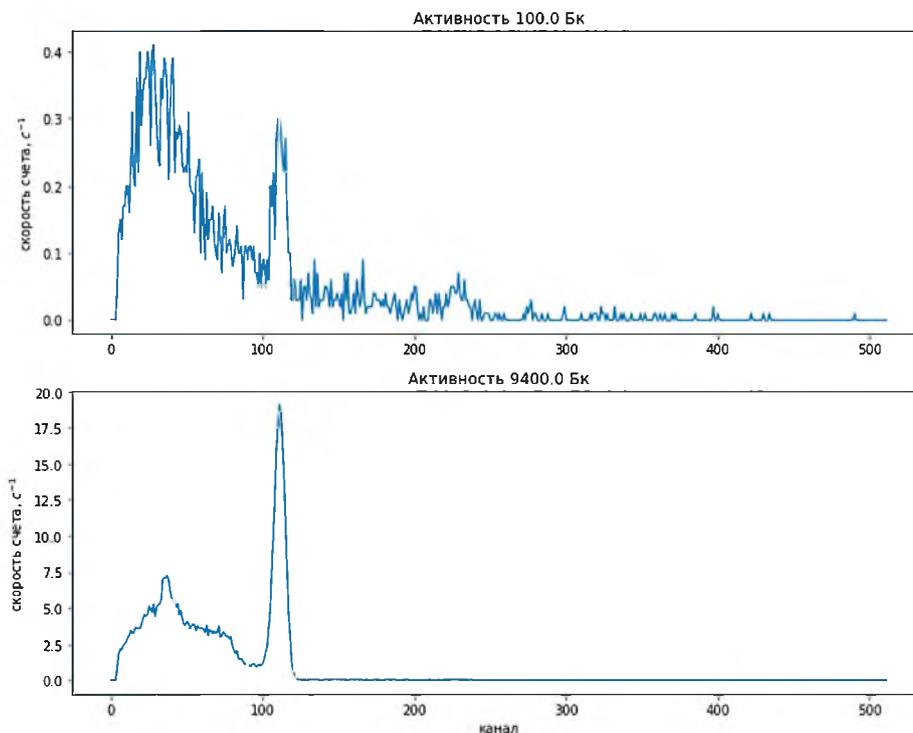


Рис. 1. Примеры полусинтетических спектров, сформированных методом случайного смешивания спектров фона и в присутствии источника

Fig. 1. Samples of semi-synthetic spectrums generated by random mixing of background spectrums and spectrums with presence of radiation source

**Оценка точности обработки спектров с использованием традиционного подхода.** В традиционном подходе для оценки  $A_1$  используются показатели скорости счета не во всех каналах детектора, а только в тех, энергия которых близка к энергии (энергиям)  $\gamma$ -квантов, испускаемых при радиоактивном распаде измеряемого радионуклида. Области спектра, близкие к данным каналам, используются для оценки фоновой скорости счета в диапазоне энергий  $\gamma$ -квантов измеряемого радионуклида. Остальная часть спектра в обработке не учитывается.

В качестве исходного уровня точности спектрометрического анализа использованы результаты, полученные на валидационном наборе спектров с использованием традиционных подходов  $\gamma$ -спектрометрии. Для этого вначале произведена калибровка детектора по спектру, полученному в присутствии источника известной активности (сумма спектров общей продолжительностью 14574 с). Центр и края пика полного поглощения  $\gamma$ -квантов  $^{137}\text{Cs}$  в области 662 кэВ установлены методом производной [8]. Скорость счета в пике полного поглощения определяемого радиоизотопа получена после отнимания площади фона, найденной методом трапеции [9]. Эффективность детектора в области 662 кэВ определена как частное нетто-скорости счета к активности источника.

На этапе валидации правая и левая граница пика полного поглощения  $\gamma$ -квантов  $^{137}\text{Cs}$  определялась на основании данных, полученных при калибровке детектора. Традиционно эти параметры устанавливаются в каждом случае отдельно, что вносит дополнительную погрешность в результаты измерения. Поэтому оценку точности традиционного метода можно признать несколько завышенной. От площади пика полного поглощения отнималась площадь фона, полученная методом трапеции для каждого из валидационных образцов отдельно. Активность источника вычислялась с помощью значения эффективности, определенного при калибровке. Точность измерения активности, оцененная с помощью среднеквадратичного отклонения, составила 4701,57 (меньше – лучше). Сопоставление истинной и рассчитанной активности источника представлено на рис. 2.

Анализ показывает высокую сходимость результатов. Абсолютное значение отклонения измеренного значения от истинного несколько увеличивается в области более высоких активностей.

**Оценка точности обработки спектров в полносвязной нейронной сети.** Итак, любая нейронная сеть является математической моделью для преобразования из  $R^N$  в  $R^M$ . В случае  $\gamma$ -спектрометрии  $R^N$  – это спектрограмма, включающая  $N$  каналов, а  $R^M$  – качественная или количественная оценка содержания  $M$  радионуклидов.

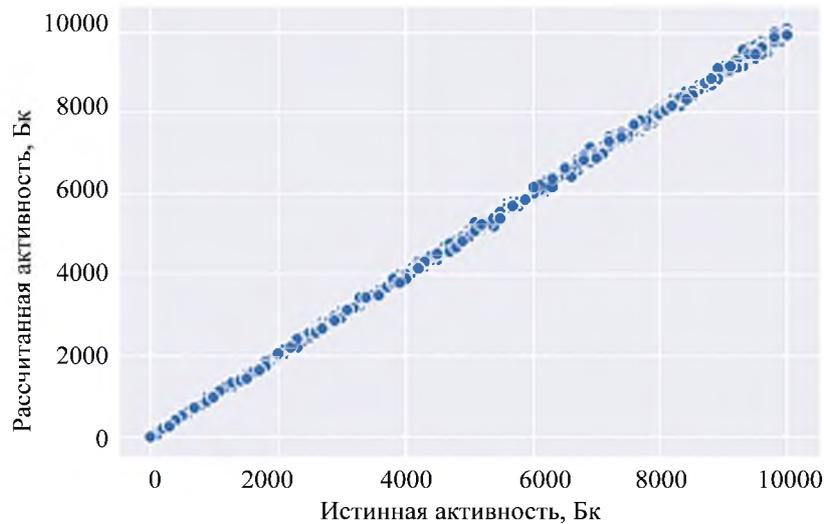


Рис. 2. Сопоставление истинной и рассчитанной активности источника традиционным способом

Fig. 2. Comparison of true and evaluated by common method activity of radiation source

Полносвязная нейронная сеть для обработки спектра  $\gamma$ -излучения от одного радионуклида ( $^{137}\text{Cs}$ ) была построена из двух скрытых слоев (100 и 10 элементов) и выходного (один элемент). На вход искусственной нейронной сети подавались значения скорости счета с 512 спектрометрических каналов без предварительной обработки. Функция активации в скрытых слоях – ReLU. В выходном слое функция активации не использовалась. Гиперпараметры полносвязной нейронной сети определены на предварительном этапе методом случайного перебора по минимальному значению среднеквадратичной ошибки между рассчитанным и истинным значениями. Протестированы следующие значения гиперпараметров нейронной сети: количество элементов в первом скрытом слое – 32, 64, 80, 100, 150, 200; количество элементов во втором скрытом слое – 2, 4, 8, 10, 12, 16; функция активации – Sigmoid, Tanh, ReLU, Leaky ReLU; количество объединяемых каналов на входе модели (Average pooling) – 1, 2, 4, 8.

Обучение полносвязной нейронной сети производилось методом Adam в 1500 эпохах, темп обучения – 0,02. Ход обучения искусственной нейронной сети представлен на рис. 3. Точность измерения удельной активности с помощью данного метода, оцененная методом среднеквадратичного отклонения, достигла 1325,29, что лучше более чем в три раза по сравнению с традиционным методом. Функция потерь на валидационной выборке очень близка к таковой на тренировочной. Переобучение модели не зафиксировано.

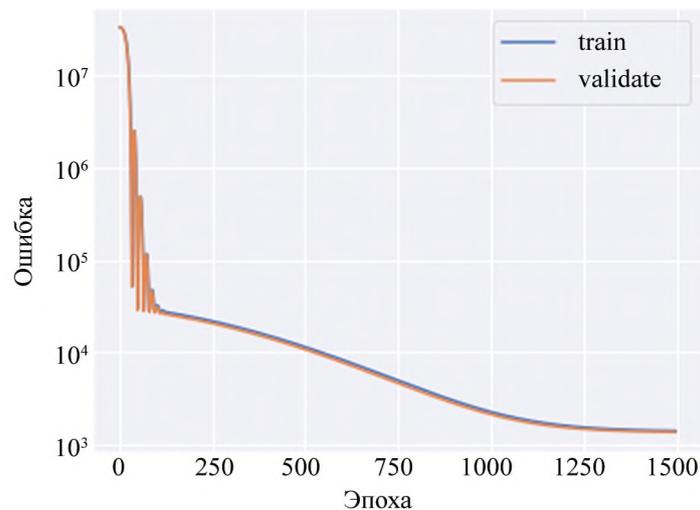


Рис. 3. Ход обучения полносвязной искусственной нейронной сети для количественного определения  $\gamma$ -излучающих радионуклидов

Fig. 3. Training of fully-connected artificial neural network for quantitative determination of  $\gamma$ -emitting radioisotopes

Сопоставление истинной и рассчитанной активности источника представлено на рис. 4. Результаты анализа указывают на высокую сходимость результатов оценки активности с истинными значениями при

использовании относительно простой нейронной сети. Абсолютные расхождения с истинными значениями в области высоких значений несколько ниже по сравнению с использованием традиционного подхода.

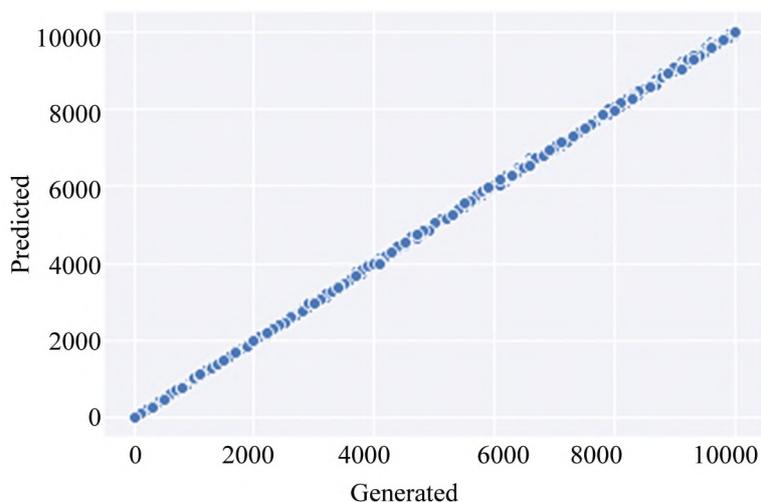


Рис. 4. Сопоставление истинной и рассчитанной активности источника в полносвязной искусственной нейронной сети

Fig. 4. Comparison of true and evaluated by fully connected neural network activity of radiation source

**Оценка точности обработки спектров в неспециализированной сверточной нейронной сети.** Полносвязная нейронная сеть не может учитывать взаимосвязи между соседними каналами спектра. При этом спектр имеет определенную одномерную структуру, выражающуюся в наличии пиков, плато комптоновских распределений и других элементов. Сильным преимуществом сверточных нейронных сетей является именно учет взаимного расположения входных сигналов в энергетических каналах. С помощью тренируемых фильтров они «распознают» типичные элементы, анализ присутствия и степень проявления которых поступает в последующие слои в качестве набора свойств, служащих основанием для строительства итогового ответа модели. В связи с этим представляется весьма перспективным применение одномерных сверточных нейронных сетей для обработки  $\gamma$ -спектрометрического сигнала.

Следует отметить, что было испытано две несколько отличающиеся архитектуры глубоких нейронных сетей для обработки спектра  $\gamma$ -излучения. Первая нейронная сеть построена из трех сверточных 1d слоев, содержащих 3, 6 и 12 фильтров соответственно, размером  $1 \times 9$  с отбором максимального из двух соседних элементов на выходе каждого из слоев (max-pooling) и соответствующим уменьшением размерности вдвое. Далее были подключены три полносвязных слоя размером 684, 100 и 25 элементов соответственно. На вход сверточной нейронной сети подавались значения скорости счета в 512 спектрометрических каналах без предварительной обработки. Функция активации в сверточных слоях и двух первых полносвязных слоях – ReLU. В выходном слое функция активации не использовалась.

Вторая сеть глубокого обучения отличалась уменьшением размера фильтра свертки до  $1 \times 5$ , но количество таких фильтров составляло 8, 16 и 32 в трех последовательных сверточных слоях с субдискретизацией вдвое в каждом из слоев. Размеры полносвязных трех слоев составили 1920, 64 и 8.

Обучение сверточных нейронных сетей производилось методом Adam в 6000 эпохах, его темп – 0,0003. Ход обучения нейронных сетей показан на рис. 5 и 6. Для предотвращения переобучения моделей использовалась ранняя остановка по ошибке на валидационной выборке. По итогам обучения среднеквадратичная ошибка для сверточной нейронной сети 1 составила 1480,96, а для сверточной нейронной сети 2 – 1588,17. Это существенно лучше по сравнению с традиционным методом, но несколько хуже при сравнении с испытанной полносвязной нейронной сетью. Функция потерь на валидационной выборке очень близка к таковой на тренировочной. Сопоставление истинной и рассчитанной с помощью сверточной нейронной сети 1 активности источника представлено на рис. 7.

При графическом сопоставлении истинной и рассчитанной активности источника было установлено, что при использовании традиционного подхода ошибка увеличивается с ростом активности источника. В случае с искусственными нейронными сетями данная закономерность проявилась гораздо слабее. В связи с этим проведен дополнительный анализ среднеквадратичного отклонения между истинным и рассчитанным значениями для различных диапазонов активности источника (табл. 1).

Сопоставление истинной и рассчитанной активности источника с помощью сверточной нейронной сети 1 представлено на рис. 7.

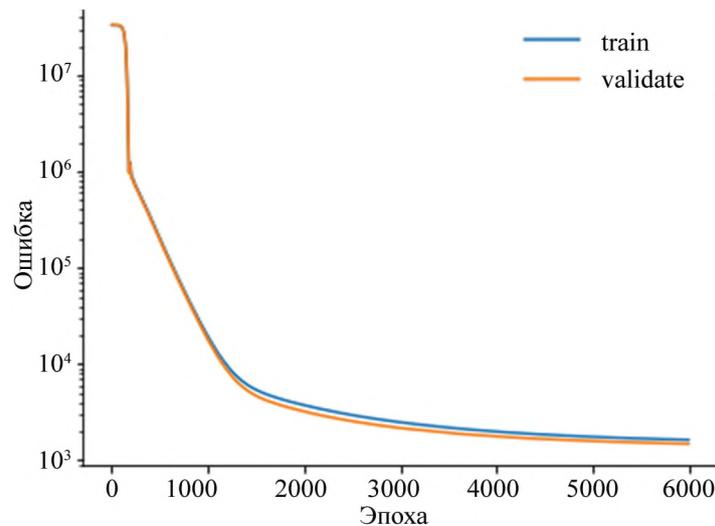


Рис. 5. Ход обучения сверточной нейронной сети 1 для количественного определения  $\gamma$ -излучающих радионуклидов

Fig. 5. Training of convolution neural network 1 for quantitative determination of  $\gamma$ -emmiting radioisotopes

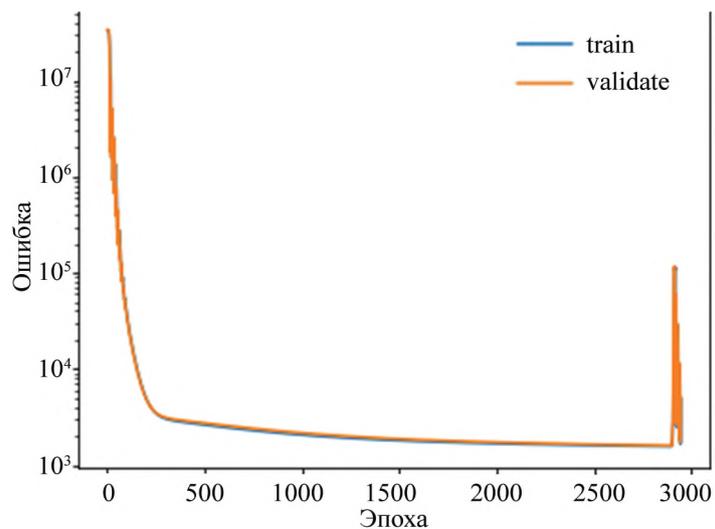


Рис. 6. Ход обучения сверточной нейронной сети 2 для количественного определения  $\gamma$ -излучающих радионуклидов

Fig. 6. Training of convolution neural network 2 for quantitative determination of  $\gamma$ -emmiting radioisotopes

Таблица 1

Сравнение точности оценки различной активности  $^{137}\text{Cs}$  испытываемыми методами (среднеквадратичное отклонение)

Table 1

Evaluation accuracy of tested methods for different activity of  $^{137}\text{Cs}$  (mean square error)

Метод	<1 КБк	1–5 КБк	5–8 КБк	8–10 КБк
Традиционный	760,93	2728,42	6570,01	8175,84
Полносвязная нейронная сеть	323,12	868,18	1593,23	2032,58
Сверточная нейронная сеть 1	1597,23	946,42	1874,94	1895,00
Сверточная нейронная сеть 2	650,3	928,77	1820,71	2729,64

Результаты анализа свидетельствуют, что среднеквадратичная ошибка оценки активности при использовании традиционного подхода увеличивается пропорционально активности источника. При использовании нейронных сетей ошибка не столь существенна, но почти всегда увеличивается с ростом активности источника.

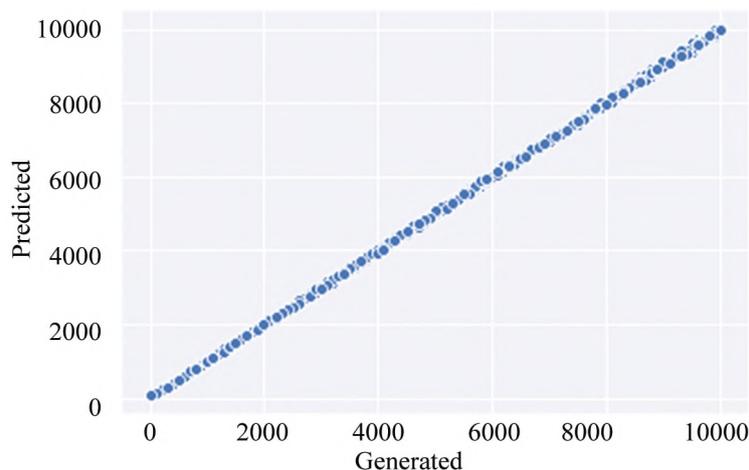


Рис. 7. Сопоставление истинной и рассчитанной активности источника в сверточной нейронной сети

Fig. 7. Comparison of true and evaluated by convolution neural network activity of radiation source

В диапазоне активности до 1000 Бк наименьшую ошибку демонстрирует полносвязная нейронная сеть, за ней следуют сверточная нейронная сеть 2 и традиционный подход. Архитектура сверточной нейронной сети 1 на относительно низких активностях источника не демонстрирует преимуществ.

В диапазонах 1000–5000 и 5000–8000 Бк полносвязная нейронная сеть сохраняет преимущество над другими решениями. Причем среднеквадратичная ошибка при ее использовании в 3–4 раза ниже по сравнению с традиционным подходом. Если при росте активности источника выше 8000 Бк среднеквадратичная ошибка при использовании полносвязной нейронной сети заметно возрастает, то в варианте со сверточной нейронной сетью 1 ошибка изменяется незначительно по сравнению с диапазоном 5000–8000 Бк. Сверточная нейронная сеть 2 не демонстрирует существенных преимуществ перед другими решениями во всех диапазонах активности источника.

Таким образом, полносвязная нейронная сеть предложенной архитектуры показывает наилучшие результаты для обработки спектра  $\gamma$ -излучения, полученного с использованием сцинтилляционного детектора NaI(Tl)  $\varnothing 63 \times 63$  мм, при активности источника до 8 КБк. При более высоких активностях преимущество имеет сверточная нейронная сеть с размером фильтров  $1 \times 9$  и их небольшим количеством (3–6–12) в каждом из слоев свертки.

Для изучения описанных в статье способов проведена количественная оценка активности точечных источников  $\gamma$ -излучения не использованных на этапах обучения и тестирования нейронных сетей. Для валидации использованы источники  $^{137}\text{Cs}$   $485 \pm 27$  Бк (Cs137-1),  $^{137}\text{Cs}$   $1755 \pm 93$  Бк (Cs137-2),  $^{241}\text{Am}$   $15460 \pm 780$  Бк (Am241). В валидационный набор включено по 10 измерений каждого из перечисленных источников, а также фон и сочетание Cs137-2 + Am241; продолжительность набора спектра (живое время) – 100 с. В качестве показателей точности использовано абсолютное смещение средней из десяти независимых оценок – от паспортного значения активности  $^{137}\text{Cs}$  источника с учетом радиоактивного распада (смещ.) и прецизионность (прец.) – стандартное отклонение в выборке из 10 измерений для каждого из методов. Результаты оценки точности испытываемых методов представлены в табл. 2.

Поскольку выраженный пик полного поглощения в диапазоне энергии  $\gamma$ -квантов  $^{137}\text{Cs}$  в спектре при отсутствии источника излучений отсутствует, то оценка точности в данном случае не имеет смысла. Но нейронные сети принимают на вход скорость во всех энергетических каналах вне зависимости от присутствия источника и его типа. Наиболее близкие значения к нулю при отсутствии источника дает полносвязная нейронная сеть при относительно высокой прецизионности. Сверточная нейронная сеть показывает наиболее высокое отклонение от нуля. В спектрах от  $^{241}\text{Am}$  также должен отсутствовать пик полного поглощения  $^{137}\text{Cs}$ , но вследствие статистических флуктуаций при непродолжительном времени измерения традиционный алгоритм в некоторых случаях определяет наличие  $^{137}\text{Cs}$ , при этом отклонение от нуля минимальное по сравнению со всеми остальными методами. При наличии относительно сильного источника  $\gamma$ -излучения, который отсутствовал в тренировочном наборе спектров, все испытанные архитектуры нейронных сетей показывают сильно смещенные в положительную сторону результаты. Наиболее высокая ошибка у полносвязной нейронной сети. Отклонения полносвязных нейронных сетей почти в два раза ниже.

Точность измерения активности точечного источника  $^{137}\text{Cs}$  (при отсутствии других источников) у традиционного метода довольно высокая. Смещение составляет 1,0–1,3 % от активности источника,

стандартное отклонение – 2–5 %. Для источника Cs137-1 все испытываемые архитектуры нейронных сетей демонстрируют более сильное смещение (в пределах 8,0 %), прецизионность измерений только у сверточной нейронной сети 2 выше, чем у традиционного метода. С повышением активности источника относительное смещение оценки с использованием нейронных сетей уменьшается (в пределах 5,1 %), полносвязная нейронная сеть показывает более высокую точность по сравнению с традиционным методом обработки спектра по обоим показателям.

Таблица 2

Показатели точности (смещение и прецизионность) измерения активности точечного источника <sup>137</sup>Cs испытываемых методов

Table 2

Indices of tested methods accuracy (bias and precision) for <sup>137</sup>Cs dot sources activity assessment

Источник (Активность <sup>137</sup> Cs, Бк)	Традиционный		Полносвязная нейронная сеть		Сверточная нейронная сеть 1		Сверточная нейронная сеть 2	
	смещение	прецизионность	смещение	прецизионность	смещение	прецизионность	смещение	прецизионность
Фон (0)	–	–	6,4	7,6	44,0	4,1	10,4	5,1
Cs137-1 (485)	5,2	24,4	27,9	15,1	-27,5	13,7	-39,2	17,0
Cs137-2 (1755)	-23,6	35,5	-4,3	22,6	-91,1	23,0	-78,3	22,2
Am241 (0)	5,9	7,4	325,1	15,6	166,9	6,1	146,7	5,7
Cs137-2+ Am241 (1755)	-14,4	40,6	154,2	22,7	-33,8	24,3	5,4	22,9

Также проведена оценка точности измерения активности <sup>137</sup>Cs в присутствии другого радионуклида с основной энергией  $\gamma$ -квантов в более низком энергетическом интервале – <sup>241</sup>Am (59,5 кэВ). Наиболее точную оценку в этой ситуации демонстрирует сверточная нейронная сеть 2, а наименее точную – полносвязная нейронная сеть. Смещение оценки традиционного метода в ситуации с двумя радионуклидами составляет 0,8 %, а стандартное отклонение – 2,3 %. Стандартное отклонение оценок нейронных сетей – 1,2–1,4 %. Примечательно, что практически во всех вариантах валидации сверточная нейронная сеть 2 демонстрирует наиболее высокую прецизионность среди всего набора испытываемых методов.

Таким образом, испытываемые архитектуры и способы тренировки нейронных сетей при валидации с источником, имеющим относительно высокую активность <sup>137</sup>Cs (1755±93 Бк), показывают способны демонстрировать сопоставимую с традиционным методом точность. В присутствии только <sup>137</sup>Cs наилучшей точностью обладает полносвязная нейронная сеть, но при добавлении <sup>241</sup>Am ее точность резко снижается. Но в последней ситуации наилучшей точностью обладает сверточная нейронная сеть 2. В отсутствии <sup>137</sup>Cs или при низкой активности источника (485±27 Бк) традиционный метод имеет существенно более высокую точность по сравнению с нейронными сетями. Решением проблемы ложной идентификации источника ионизирующего излучения может быть прибавление к нейронной сети дополнительного блока оценки присутствия радионуклидов из заданного набора.

Следовательно, обработка спектров основана на выделении значимых признаков (площадь пиков в определенном энергетическом диапазоне, высота и ширина пиков и др.), очистка от шумов, получение количественной оценки величины этих признаков и расчете интересующих показателей на основе величины признаков. На сегодняшний день превалирует аналитический способ выполнения данных операций. Однако эти задачи являются классическими для машинного обучения, применяя которое можно надеяться на повышение эффективности и надежности обработки спектрограмм.

К числу первых работ по оценке потенциала искусственных нейронных сетей для анализа спектрограмм ионизирующих излучений можно отнести исследования Gallagher и Deason, попытавшихся использовать однослойную нейронную сеть для обработки спектра Рентгеновского излучения при классификации минералов [10]. Одни из первых испытаний возможности  $\gamma$ -спектрометрического количественного определения радионуклидов с помощью нейронных сетей провели Vigneron и др. [11], Abdel-Aal и др. [12].

В работах Kamuda и др. [13; 14] показаны преимущества искусственных нейронных сетей для количественного анализа спектров  $\gamma$ -излучения от нескольких радионуклидов. Однако авторы для создания

тренировочного набора спектров использовали метод Монте-Карло, а не реальные спектрограммы, которые могут отличаться в деталях, способных оказать существенное влияние на качество обучения моделей.

Усложнение архитектуры нейронной сети повышает точность оценки и позволяет решать более трудные задачи. Наиболее проблемным моментом в использовании нейронных сетей для обработки спектрограмм ионизирующих излучений является сильное ухудшение точности результата при условиях измерений (окружающая среда, детектор) отличных от тех, которые существовали при наборе данных для тренировки модели. Так, Varley и др. [15] указывают, что полносвязные нейронные сети демонстрируют наилучшие результаты при *in situ* измерениях загрязнения участков радием. Однако изменение условий проведения измерений резко снижает качество результата. Авторы приходят к выводу, что для сохранения эффективности метода в широком диапазоне условий необходим более обширный набор данных для обучения модели.

Для обучения искусственной нейронной сети, обрабатывающей спектр с детектора NaI(Tl) Kim и др. [7] использовали полусинтетические спектры, полученные комбинацией относительно немногочисленных спектров от образцовых источников, содержащих по одному радионуклиду, и аугментацию (искусственное искажение). Проверка показала, что использование для обучения модели полусинтетических спектров вместо синтезированных методом Монте-Карло дает лучший результат, а аугментация данных повышает устойчивость к изменению условий измерения.

Kamuda и др. [16] продемонстрировали возможности многослойных полносвязных и сверточных нейронных сетей для идентификации радионуклидов по  $\gamma$ -спектрам и оценки отношения их активности к активности опорных естественных радионуклидов. Сделано заключение, что сверточные нейронные сети имеют более высокую способность к обобщению, а значит и более устойчивы к отклонению условий измерения от идеальных, по сравнению с полносвязными сетями в приложении к  $\gamma$ -спектрометрии.

В настоящих исследованиях  $\gamma$ -спектрометрические измерения проводились в сильно стандартизованных условиях. Влияние посторонних источников излучения сильно ограничивалось использованием свинцовой защиты вокруг детектора и образца, набор спектров осуществлялся одним и тем же детектором без изменения параметров его работы, геометрия взаимного расположения детектора и образца была неизменной. В таких условиях наиболее эффективным в большинстве случаев оказалось использование полносвязной нейронной сети. Вместе с тем один из испытанных вариантов сверточной нейронной сети (фильтры  $1 \times 9$  в количестве 3, 6, 12 в трех слоях) при активностях выше 1000 Бк показал результаты лишь немногим хуже полносвязной нейронной сети, а при увеличении активности выше 8000 Бк – лучше. Анализ полученных результатов свидетельствует, что при проведении количественных  $\gamma$ -спектрометрических измерений в стандартизованных условиях полносвязная нейронная сеть может демонстрировать более высокую эффективность по сравнению со сверточной, но ее преимущества теряются с увеличением активности источника.

Результаты экспериментальной работы показали перспективность использования искусственных нейронных сетей для количественной  $\gamma$ -спектрометрии в стандартизованных условиях и при использовании защиты. Однако исследования в этом направлении должны быть продолжены с целью разработки архитектуры нейронной сети, способной демонстрировать низкую ошибку измерений в широком диапазоне активностей и при наличии нескольких изотопов в измеряемом образце.

## Заключение

Проведенный анализ эффективности использования искусственных нейронных сетей для обработки  $\gamma$ -спектров, полученных на сцинтилляционном NaI(Tl) детекторе от точечного источника  $^{137}\text{Cs}$ , показал их преимущества по сравнению с использованием стандартного аналитического метода обработки спектра. В зависимости от активности источника среднеквадратичная ошибка измерения при использовании полносвязной нейронной сети оказалась в 2–4 раза ниже по сравнению со стандартным методом при времени измерения 100 с. В сильно стандартизованных условиях преимущества сверточных нейронных сетей проявляются при увеличении активности источника излучения. Валидация при помощи источников, не использованных при обучении нейронных сетей, показала, что последние могут иметь преимущества по сравнению с традиционным методом при относительно высокой активности.

## Библиографические ссылки / References

1. Keller PE. Gamma spectral analysis via neural networks. In: *Proceedings of 1994 IEEE nuclear science symposium – NSS'94*. 1994. p. 341–345. DOI: 10.1109/nssmic.1994.474365.
2. Vega-Carrillo HR, Hernández-Dávila VM, Manzanares-Acuña E, Sánchez GAM, Torre MPI de la, Barquero R, et al. Neutron spectrometry using artificial neural networks. *Radiation Measurements*. 2006;41(4):425–431. DOI: 10.1016/j.radmeas.2005.10.003.

3. Pilato V, Tola F, Martinez J, Huver M. Application of neural networks to quantitative spectrometry analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1999;422(1–3):423–427. DOI: 10.1016/s0168-9002(98)01110-3.
4. Yoshida E, Shizuma K, Endo S, Oka T. Application of neural networks for the analysis of gamma-ray spectra measured with a Ge spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2002;484(1–3):557–563. DOI: 10.1016/s0168-9002(01)01962-3.
5. Dragović S, Onjia A, Stanković S, Aničin I, Bačić G. Artificial neural network modelling of uncertainty in gamma-ray spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2005;540(2–3):455–463. DOI: 10.1016/j.nima.2004.11.045.
6. Mace EK, Ward JD, Aalseth CE. Use of neural networks to analyze pulse shape data in low-background detectors. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2018;318:117–24. DOI: 10.1007/s10967-018-5983-1.
7. Kim J, Lim KT, Kim J, Kim C-j, Jeon B, Park K, et al. Quantitative analysis of NaI(Tl) gamma-ray spectrometry using an artificial neural network. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2019;944:162549. DOI: 10.1016/j.nima.2019.162549.
8. Shi R, Tuo X, Zheng H, Yao X, Liu Y, Shi F, et al. Step-approximation SNIP background-elimination algorithm for HPGE gamma spectra. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2018;885:60–66. DOI: 10.1016/j.nima.2017.12.064.
9. Gilmore GR. Practical gamma-ray spectrometry. 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley & Sons; 2008. DOI: 10.1002/9780470861981.
10. Gallagher M, Deacon P. Neural networks and the classification of mineralogical samples using x-ray spectra. In: *Proceedings of the 9<sup>th</sup> international conference on neural information processing, 2002. ICONIP '02*. 2002;5:2683–2687. DOI: 10.1109/iconip.2002.1201983.
11. Vigneron V, Morel J, Lépy M, Martinez J. Statistical modelling of neural networks in  $\gamma$ -spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1996;369(2–3):642–647. DOI: 10.1016/s0168-9002(96)80068-4.
12. Abdel-Aal R, Al-Haddad M. Determination of radioisotopes in gamma-ray spectroscopy using abductive machine learning. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1997;391(2):275–288. DOI: 10.1016/s0168-9002(97)00391-4.
13. Kamuda M, Sullivan CJ. An automated isotope identification and quantification algorithm for isotope mixtures in low-resolution gamma-ray spectra. *Radiation Physics and Chemistry*. 2019;155:281–286. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2018.06.017.
14. Kamuda M, Stimmet J, Sullivan CJ. Automated isotope identification algorithm using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2017;64(7):1858–1864. DOI: 10.1109/tns.2017.2693152.
15. Varley A, Tyler A, Smith L, Dale P, Davies M. Remediating radium contaminated legacy sites: Advances made through machine learning in routine monitoring of “hot” particles. *Science of the Total Environment*. 2015;521–522:270–279. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.03.131.
16. Kamuda M, Zhao J, Huff K. A comparison of machine learning methods for automated gamma-ray spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2020;954:161385. DOI: 10.1016/j.nima.2018.10.063.

Статья поступила в редколлегию 05.04.2021.  
Received by editorial board 05.04.2021.

УДК 621.039.5:614.87

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ

Ю. Е. КРЮК<sup>1)</sup>, А. Л. МОСТОВЕНКО<sup>1)</sup>, Е. К. НИЛОВА<sup>1)</sup>, В. А. КУЗЬМИНЧУК<sup>1)</sup>, К. Ю. ВОЙТЕНКО<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Центр по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, ул. Штилевского, 59-7Н, 220067, г. Минск, Беларусь

Проведен сравнительный анализ программных средств для оценки и прогнозирования параметров, характеризующих радиационную обстановку, при возникновении гипотетической аварийной ситуации на объектах использования атомной энергии. Для выполнения анализа выходных параметров и ранжирования программных средств по степени заложенного в них консерватизма выбран сценарий аварийной ситуации на объекте проекта АЭС-2006, связанный со снижением температуры теплоносителя и, как следствие, изменением реактивности. Рассматривалось возникновение спектра разрывов паропроводов внутри и вне контейнента вплоть до максимального диаметра парового трубопровода с разрывом одной трубки в парогенераторе, в результате которого происходят потеря теплоносителя первого контура, длительное истечение пара из аварийного парогенератора и выброс с паром радиоактивных продуктов, накопившихся в первом контуре, в машинный зал и окружающую среду. Представлены результаты ранжирования программных средств для применения в деятельности информационно-аналитического центра Департамента по ядерной и радиационной безопасности. Установлено, что в расчетные коды оперативной оценки (HotSpot и RECASS Express) заложена наибольшая степень консерватизма. Данные инструментарии позволяют обеспечивать быстрые упрощенные расчеты для ранней стадии аварии на радиационно-опасном объекте и могут быть рекомендованы к использованию при оценке и прогнозировании радиационной обстановки в качестве первых инструментариев. При этом статус проведенной оценки радиационной ситуации рекомендуется считать предварительным, дополнительным к основным расчетам, выполненным, к примеру, расчетными кодами JRODOS и RECASS NT, технические возможности которых позволяют выполнять оценку радиационного воздействия, в том числе на значительных расстояниях от источника как в случае возникновения аварийных ситуаций, так и в рамках проведения командно-штабных учений.

**Ключевые слова:** программные средства; аварийные ситуации; радиационная обстановка; объемная активность; плотность загрязнения.

### Образец цитирования:

Крюк ЮЕ, Мостовенко АЛ, Нилова ЕК, Кузьминчук ВА, Войтенко КЮ. Сравнительный анализ программных средств для оценки и прогнозирования показателей радиационной обстановки. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;2:55–60. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-55-60>

### For citation:

Kruk YuE, Mostovenko AL, Nilova EC, Kuzminchuk VA, Voitenko KYu. Comparative analysis of softwares for assessment and prediction of radiation situation indicators. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;2:55–60. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-55-60>

### Авторы:

**Юлианна Евгеньевна Крюк** – кандидат биологических наук, доцент; директор Центра по ядерной и радиационной безопасности.

**Андрей Леонидович Мостовенко** – заместитель директора Центра по ядерной и радиационной безопасности.

**Екатерина Константиновна Нилова** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела радиационной безопасности.

**Виктор Анатольевич Кузьминчук** – младший научный сотрудник отдела радиационной безопасности.

**Кирилл Юрьевич Войтенко** – ведущий инженер отдела радиационной безопасности.

### Authors:

**Yulianna E. Kruk**, PhD (biology), docent, director of the center for nuclear and radiation safety.

[kruk@bcnrs.by](mailto:kruk@bcnrs.by)

**Andrey L. Mostovenko**, deputy director of the center for nuclear and radiation safety.

[mostovenko@bcnrs.by](mailto:mostovenko@bcnrs.by)

**Ekaterina C. Nilova**, PhD (biology), senior researcher at the department of radiation safety department.

[nilova@bcnrs.by](mailto:nilova@bcnrs.by)

**Viktor A. Kuzminchuk**, junior researcher at the department of radiation safety.

[kuzminchuk@bcnrs.by](mailto:kuzminchuk@bcnrs.by)

**Kirill Yu. Voitenko**, leading engineer at the department of radiation safety.

[aitsenka@bcnrs.by](mailto:aitsenka@bcnrs.by)

## COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARES FOR ASSESSMENT AND PREDICTION OF RADIATION SITUATION INDICATORS

*Yu. E. KRUK<sup>a</sup>, A. L. MOSTOVENKO<sup>a</sup>, E. C. NILOVA<sup>a</sup>, V. A. KUZMINCHUK<sup>a</sup>, K. Yu. VOITENKO<sup>a</sup>*

*<sup>a</sup>Center for Nuclear and Radiation Safety of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus  
59/7N Shpileŭskaga Street, Minsk 220067, Belarus  
Corresponding author: E. C. Nilova (nilova@bcnrs.by)*

This article presents the results of comparative analysis of software tools for assessing and predicting parameters characterizing the radiation situation in the event of a hypothetical emergency at nuclear facilities. To analyze the output parameters and rank the software according to the degree of conservatism, an emergency scenario at the AES-2006 design facility was selected. This scenario is associated with a decrease in the coolant temperature and, as a consequence, a change in reactivity. The results of ranking software tools for use in the activities of the Information and Analytical Center of the Department of Nuclear and Radiation Safety are presented. It has been established that the highest degree of conservatism is embedded in the operational assessment codes (HotSpot and RECASS Express). These tools make it possible to provide quick simplified calculations for the early stage of an accident at a Nuclear Facility and can be recommended for use in assessing and predicting the radiation situation as the first tools. In this case, the status of the assessment of the radiation situation is recommended to be considered preliminary, additional to the main calculations performed, for example, with the JRODOS and RECASS NT design codes, the technical capabilities of which allow assessing the radiation impact, including at significant distances from the source, as in the case of emergency situations, and within the framework of the command and staff exercises.

**Keywords:** software tools; emergency situations; radiation situation; beyond design basis accidents; volumetric activity; pollution density.

### Введение

В настоящее время во многих странах сформированы национальные системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, обеспечивающие как аварийную готовность и аварийное реагирование в случае ядерных и радиационных аварий, так и контроль состояния объектов использования атомной энергии, а также информационно-аналитическую поддержку в случае возникновения аварийных ситуаций. Характер и масштабы аварийных процедур для обеспечения готовности и реагирования должны соответствовать потенциальной величине выбросов радиоактивных веществ и характеру угрозы. Оценка угрозы должна проводиться таким образом, чтобы обеспечивались основные детальные требования к мерам по обеспечению готовности и реагирования. При оценке угрозы должны быть определены территории за пределами площадки, для которых ядерная или радиационная аварийная ситуация может требовать инициирования и корректировки срочных защитных и других мер в пределах зон аварийного реагирования в соответствии со стратегией защиты.

Важной составной частью функционирования таких систем является применение систем поддержки принятия решений в случае чрезвычайных ситуаций на радиационно опасных объектах. Они призваны обеспечивать как анализ, складывающейся в результате аварии радиационной обстановки, и прогноз ее развития, так и выработку рекомендаций по защите персонала объектов использования атомной энергии, населения, подвергшегося воздействию радиоактивного выброса и снижению возможных последствий для окружающей среды.

Прогноз масштабов последствий потенциальных аварий должен учитывать метеорологические, почвенно-климатические, демографические, экономические и иные особенности зон аварийного реагирования.

В этой связи представляется целесообразным провести ранжирование отдельных программных средств для оценки и прогнозирования показателей радиационной обстановки при возникновении аварийных ситуаций на объектах использования атомной энергии по степени заложенного в них консерватизма для применения в деятельности информационно-аналитического центра Департамента по ядерной и радиационной безопасности.

Цель исследований – выполнить сравнительный анализ выходных параметров и ранжирование по степени консерватизма программных средств для оценки и прогнозирования показателей радиационной обстановки при возникновении аварийных ситуаций на объектах использования атомной энергии.

### Материалы и методы исследования

В качестве инструментариев для оценки и прогнозирования показателей радиационной обстановки при возникновении гипотетических аварийных ситуаций на объектах использования атомной энергии

и реализации соответствующих задач в рамках деятельности информационно-аналитического центра Госатомнадзора определен перечень пакетов следующих программных средств: JRODOS (ЕС), RECASS NT, Express (Российская Федерация) и HotSpot (США).

Программно-технический комплекс RECASS (NT) разработан Федеральным информационно-техническим центром Росгидромета (далее – ФИАЦ Росгидромета) для оценки обстановки и прогноза последствий поступления (в результате выбросов, сбросов, разливов, взрывов и пожаров) загрязняющих веществ в окружающую среду, а также поддержки принятия решений в условиях загрязнения природной среды, в том числе при радиационных авариях [1]. RECASS NT внедрена и много лет успешно используется в ФИАЦ Росгидромета, на российских АЭС – Ленинградской, Волгодонской, Нововоронежской, Кольской, Белоярской, Билибинской, Смоленской, Калининской и Курской. В составе системы RECASS был разработан программный инструмент EXPRESS для предварительных расчетов загрязнения воздуха и доз облучения населения при аварийных атмосферных выбросах радиоактивности [1].

Код «HotSpot» был разработан Lawrence Livermore Laboratory (США) при моделировании распространения радиоактивных веществ в атмосфере. Для целей аварийного реагирования код позволяет предоставлять первичные расчеты, необходимые для быстрой оценки текущей радиационной обстановки для 4-х моделируемых случаев аварийного выброса: взрыв, пожар, шлейф и ресуспензия.

Система RODOS (ЕС) представляет собой синтез ряда инновационных методов и технологий для проведения оценки и прогнозирования радиационной обстановки, а также выработки защитных мероприятий с целью снижения последствий радиационной аварии. Модули прогнозирования позволяют выполнять прогноз загрязнения атмосферы и водных объектов как в локальном масштабе (до 100 км), так и до нескольких тысяч километров, осуществлять оценку доз облучения с применением контрмер как с ними, так и без них. Заложенные функции и инструменты позволяют адаптировать модели, базы данных и пользовательский интерфейс к национальным условиям и предпочтениям пользователя.

В инструментариях, предназначенных для оперативной оценки, позволяющих проводить упрощенные расчеты для ранней стадии аварии и наглядное представление результатов расчетов (RECASS Express и HotSpot), в основу расчетов концентраций радионуклидов в приземном слое атмосферы положена Гауссова модель переноса поллютантов от мгновенного точечного источника. В модулях JRODOS оценка переноса и осаждения радионуклидов производится также с помощью модели переноса частиц Лагранжа [2]. Гауссова же модель переноса применима для расчетов концентраций радионуклидов в силу выполнения следующих условий:

- радиоактивные примеси представляют собой газы или паро-газовые смеси с плотностью, не превышающей плотность воздуха, либо аэрозоли с размерами частиц до 10 мкм;
- до момента рассеяния облака радиоактивных примесей метеоусловия предполагаются неизменными;
- применяются эмпирические зависимости для дисперсий с учетом условий данной пересеченной местности;

- расстояния от источника рассматриваются в интервале от 100 м до 10 км [3; 4].

Таким образом, модель атмосферной дисперсии Гаусса является одной из наиболее распространенных и широко применяемых из них для оценки приземных концентраций загрязнителя, поступающего из источника загрязнения [5].

Расчет параметров, характеризующих радиационную обстановку, проводился в соответствии с заложенными в программных кодах подходами.

Для проведения сравнительного анализа выходных параметров и ранжирования указанных программных средств по степени заложенного консерватизма в рамках выполнения работы<sup>1</sup> выбран сценарий аварийной ситуации на объекте проекта АЭС-2006, связанный со снижением температуры теплоносителя и, как следствие, изменением реактивности.

В качестве аварийного сценария рассматривалось возникновение спектра разрывов паропроводов внутри и вне контайнмента вплоть до максимального диаметра парового трубопровода с разрывом одной трубки в парогенераторе, в результате которого происходят потеря теплоносителя первого контура, длительное истечение пара из аварийного парогенератора и выброс с паром радиоактивных продуктов, накопившихся в первом контуре, в машинный зал и окружающую среду. Согласно рассматриваемому сценарию, выброс продуктов деления в атмосферу происходит через быстродействующую редуцирующую установку сброса пара неаварийного парогенератора при разрыве паропровода внутри контайнмента с разрывом одной трубки в парогенераторе (на отметке 32 м) и из аварийного парогенератора при разрыве паропровода вне контайнмента с разрывом одной трубки в парогенераторе (высота выброса – 10 м). Активность радионуклидов в выбросе (без учета инертных радиоактивных газов и  $^{132-135}\text{I}$ ):  $^{131}\text{I} - 8,60 \cdot 10^{11}$  Бк,  $^{134}\text{Cs} - 5,22 \cdot 10^9$  Бк,  $^{137}\text{Cs} - 7,81 \cdot 10^9$  Бк.

<sup>1</sup>ГР 20201416. Выполнить моделирование процессов смешения теплоносителя в первом контуре и сравнительный анализ показателей радиационной обстановки в аварийных ситуациях. Минск: [б. н.]; 2020. 197 с.

Принимался атмосферный путь переноса радионуклидов как один из наиболее значимых путей распространения радионуклидов в случае возникновения аварийных ситуаций на объектах использования атомной энергии [5]. Направление ветра выбрано с учетом формирования загрязнения на территории Республики Беларусь (в восточном направлении). Распространение радиоактивных выбросов находится в прямой зависимости от высоты их подъема, обусловленной разностью температур в источнике и окружающей среде. Для проведения расчетов принято одно из наихудших метеорологических условий, свойственных району размещения Белорусской АЭС: скорость ветра 5 м/с; категория устойчивости атмосферы по Пасквиллу – F<sup>2</sup>, продолжительность однофазного выброса – 1 ч.

### Результаты исследования и их обсуждение

В качестве выходных параметров, характеризующих радиационную обстановку в результате возникновения гипотетической аварийной ситуации, выбраны интегральная суммарная объемная активность радионуклидов в воздухе, Бк·с/м<sup>3</sup> и плотность поверхностного загрязнения через 2 ч, Бк/м<sup>2</sup>.

Примеры представления результатов расчетов плотности поверхностного загрязнения <sup>131</sup>I через 2 ч после выброса с применением расчетных кодов JRODOS и RECASS NT на картографической основе в виде тематического слоя приведены на рис. 1, 2.

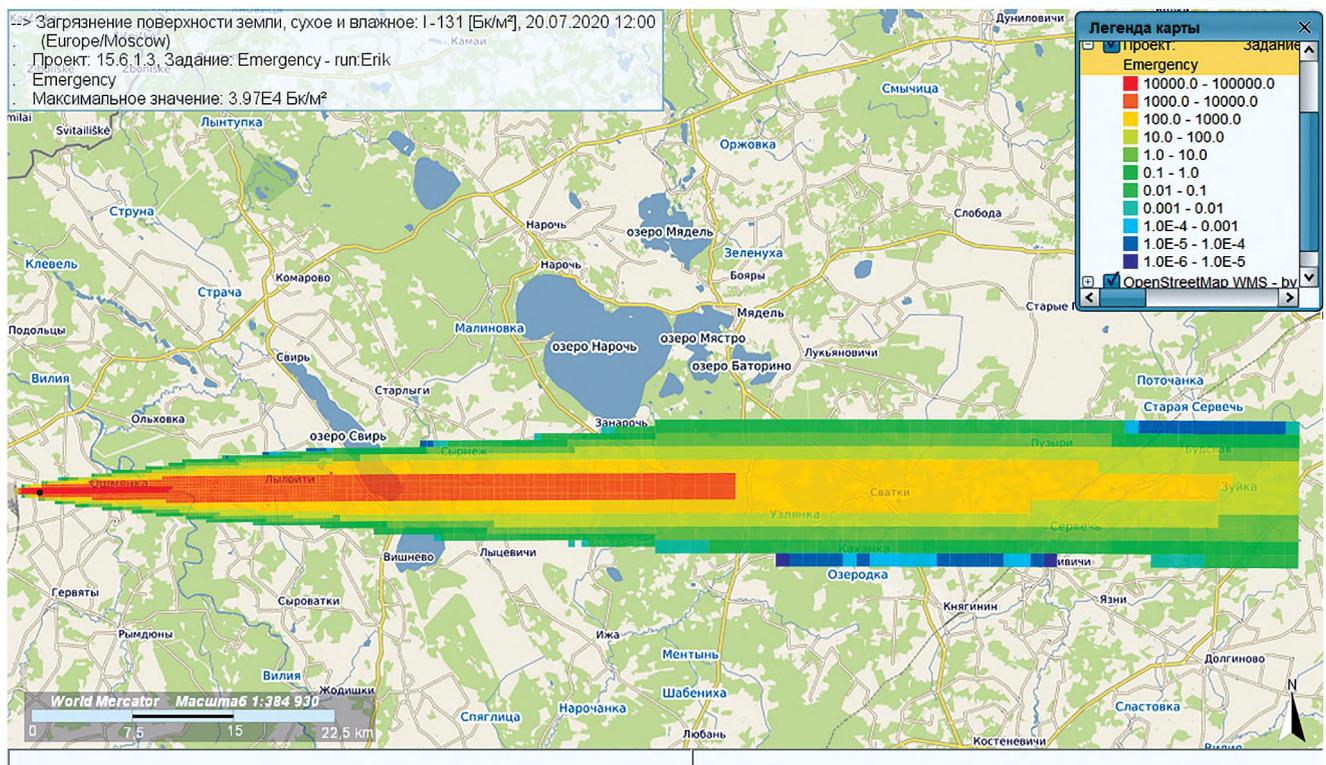


Рис. 1. Результаты оценки плотности поверхностного загрязнения <sup>131</sup>I через 2 ч после выброса с применением кода JRODOS, Бк/м<sup>2</sup>

Fig. 1. The results of assessing the density of surface contamination with <sup>131</sup>I (2 hours after the release) using the JRODOS code, Bq/m<sup>2</sup>

В табл. представлен сравнительный анализ результатов расчетов радиационных последствий аварийной ситуации, связанной с возникновением спектра разрывов паропроводов внутри и вне контейнента вплоть до максимального диаметра парового трубопровода с разрывом одной трубки в парогенераторе, выполненных с применением JRODOS, RECASS NT и Express, а также HotSpot.

Принимая во внимание представленные в табл. значения параметров, характеризующие радиационное воздействие при возникновении рассмотренного события, расчетные коды по степени заложенного в них консерватизма можно ранжировать в следующий логических ряд по убыванию значений приведенных характеристик (начиная с программных инструментов, предназначенных для оперативных предварительных расчетов загрязнения воздуха, поверхности и доз облучения): HotSpot→ RECASS

<sup>2</sup>1588-ПЗ-ОИ4. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в Республике Беларусь. Книга 11: Оценка воздействия на окружающую среду. Часть 9. Заявление о возможном воздействии на окружающую среду АЭС. Минск: [б. н.]; 2009. 131 с.

Express → JRODOS → RECASS NT. Различие в значениях, приведенных в таблице величин, характеризующих радиационную обстановку, ожидаемую в случае возникновения гипотетической аварийной ситуации, рассчитанных с применением рассматриваемых расчетных кодов, обусловлено как отличиями в заложенных в программных средствах моделях для оценки рассеяния радиоактивной примеси, так и неравенством значений параметров, используемых в расчетах искомых характеристик с применением различных инструментариев.

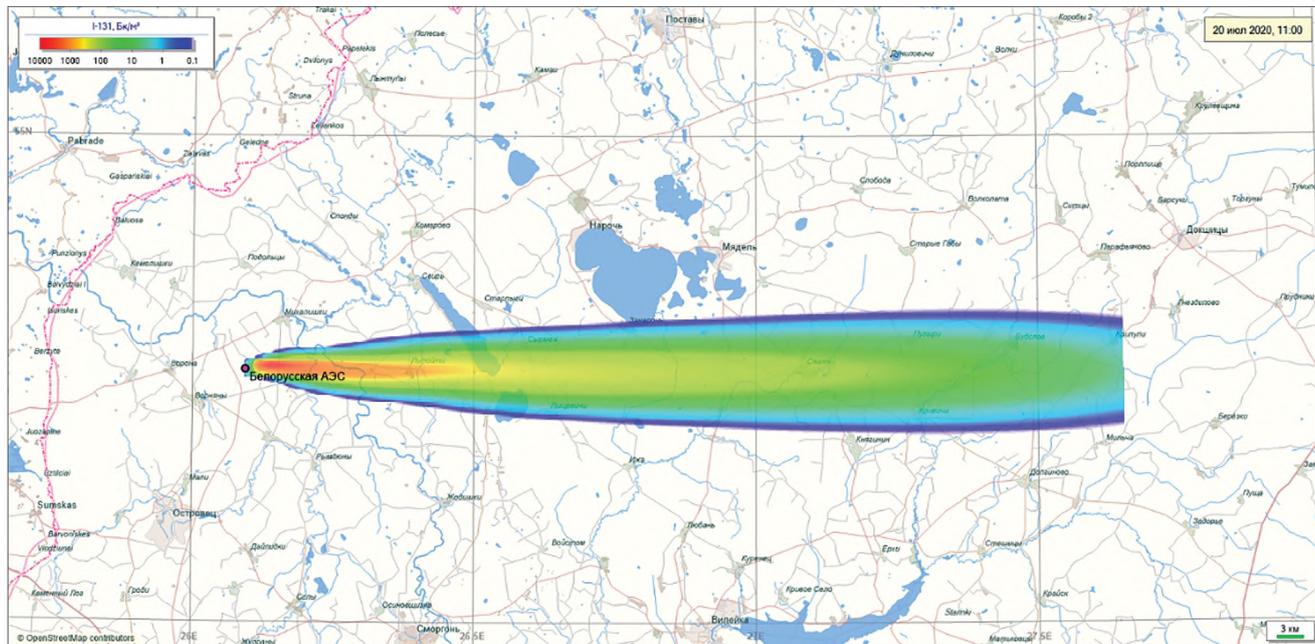


Рис. 2. Результаты оценки плотности поверхностного загрязнения  $^{131}\text{I}$  через 2 ч после выброса с применением кода RECASS NT, Бк/м<sup>2</sup>

Fig. 2. The results of assessing the density of surface contamination with  $^{131}\text{I}$  (2 hours after the release) using the RECASS NT code, Bq/m<sup>2</sup>

Таблица

Сравнительный анализ результатов расчетов радиационных последствий возникновения аварийной ситуации, выполненных с применением JRODOS, RECASS NT, Express и HotSpot

Table

Comparative analysis of the results of calculations of the radiation consequences of an emergency, performed using JRODOS, RECASS NT, Express and HotSpot

Расчетный код	Расстояние по оси следа от АЭС, где ожидаются максимальные значения параметров, км	Интегральная суммарная объемная активность радионуклидов в воздухе, Бк·с/м <sup>3</sup>	Плотность поверхностного загрязнения через 2 ч после выброса, Бк/м <sup>2</sup>		
			$^{134}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{131}\text{I}$
JRODOS	1–3	$1,3 \cdot 10^9$	$2,6 \cdot 10^2$	$3,8 \cdot 10^2$	$4,0 \cdot 10^4$
RECASS NT	1–2	$1,2 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^4$
RECASS Express	1	$4,8 \cdot 10^{10}$	$3,9 \cdot 10^3$	$5,8 \cdot 10^3$	$8,1 \cdot 10^5$
HotSpot	0,2–0,4	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^6$		

### Заключение

В результате сравнительного анализа выходных параметров программных средств при выполнении оценки радиационных последствий в случае возникновения спектра разрывов паропроводов внутри и вне контейнента вплоть до максимального диаметра парового трубопровода с разрывом одной трубки

в парогенераторе установлено, что в расчетные коды оперативной оценки (HotSpot и RECASS Express) заложена наибольшая степень консерватизма. При этом данные инструментарии позволяют обеспечивать быстрые упрощенные расчеты для устранения ранней стадии аварии на радиационно-опасном объекте и наглядное представление результатов расчетов. В этой связи они являются удобными программными продуктами для проведения обучения и тренировок экспертов по анализу ситуаций при гипотетических аварийных выбросах радиоактивных веществ и могут быть рекомендованы к использованию в целях оперативного исполнения функций информационно-аналитического центра Госатомнадзора по оценке и прогнозированию радиационной обстановки в качестве первых инструментариев.

Однако заложенные в данных инструментариях подходы накладывают временные и пространственные ограничения ввиду существенного увеличения погрешности прогноза по мере отдаления от источника на расстояние свыше 10 км и при времени моделирования свыше нескольких часов. В этой связи статус проведенной оценки радиационной обстановки рекомендуется считать предварительным, дополнительным к основным расчетам, выполненным, к примеру, расчетными кодами JRODOS и RECASS NT, технические возможности которых позволяют выполнять оценку радиационного воздействия, в том числе на значительных расстояниях от источника как в случае возникновения аварийных ситуаций, так и в рамках проведения командно-штабных учений. Он может применяться также в качестве многофункциональных систем выработки адекватных к частным условиям с учетом ряда количественных и качественных критериев стратегических направлений проведения контрмер для ликвидации/минимизации возможных последствий аварий для использования лицами, принимающими решение.

### Библиографические ссылки

1. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Научно-производственное объединение «Тайфун» [Интернет]. [Прочитано 8 июня 2020]; 2020. Доступно по: <http://www.rpatyphoon.ru/products/software-hardware/recass.php>.
2. Franc VD, et al. Atmospheric Transport Modeling with 3D Lagrangian Dispersion Codes Compared with SF6 Tracer Experiments at Regional Scale. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2007;3;1–13.
3. Колодкин ВМ, Мурин АВ, Петров АК и др. *Количественная оценка риска химических аварий*. Ижевск: Удмуртский университет; 2001. 228 с.
4. Greenberg HR, et al. *Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry*. New York: Van Nostrand Reinhold Co; 1991. 315 p.
5. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety reports series № 19. Vienna: IAEA; 2001. 229 p.

### References

1. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Research and Production Association «Typhoon» [Интернет]. [Cited 2020 June 8]; 2020. Available from: <http://www.rpatyphoon.ru/products/software-hardware/recass.php>.
2. Franc VD, et al. Atmospheric Transport Modeling with 3D Lagrangian Dispersion Codes Compared with SF6 Tracer Experiments at Regional Scale. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2007;3;1–13.
3. Kolodkin VM, Murin AV, Petrov AK, et al. *Kolichestvennaya otsenka riska himicheskikh avarii* [Quantitative assessment of the risk of chemical accidents]. Izhevsk: Udmurt University; 2001. 228 p. Russian.
4. Greenberg HR, et al. *Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry*. New York: Van Nostrand Reinhold Co; 1991. 315 p.
5. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety reports series N 19. Vienna: IAEA; 2001. 229 p.

Статья поступила в редакцию 01.02.2021.  
Received by editorial board 01.02.2021.

УДК 504.03;614.72

## ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЕЙ СОДЕРЖАНИЯ РАДОНА В ВОЗДУХЕ ЗДАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ НЕКОТОРЫХ АДМИНИСТРАТИВНЫХ РАЙОНОВ ВИТЕБСКОЙ ОБЛАСТИ

**И. В. ЖУК<sup>1)</sup>, Ж. А. ЛУКАШЕВИЧ<sup>1)</sup>, Т. В. ЛИСЯНОВИЧ<sup>1)</sup>,  
Л. Л. ВАСИЛЕВСКИЙ<sup>1)</sup>, Д. А. ХАКИМОВ<sup>1)</sup>, А. В. СОСНОВСКИЙ<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси,  
а/я 119, 220109, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Белорусский государственный медицинский университет,  
пр. Дзержинского, 83, 220116, г. Минск, Беларусь

Источником радона являются неизменные концентрации урана-238, радия-226, которые встречаются в природе в почвах и горных породах. В Республике Беларусь не менее 40 % территории является потенциально радоноопасной. При этом радон и радиоактивные продукты его распада вносят основной вклад в радиационный фон жилых и производственных помещений. Это обуславливает необходимость проведения систематических радонометрических исследований по мониторингу радона в воздухе помещений. В Республике Беларусь они проводятся научным учреждением «ОИЭЯИ-Сосны» с 2002 г. Объектом исследований является объемная активность радона в воздухе жилых и административных зданий. В соответствии с рекомендациями Международной Комиссии по Радиационной защите измерения объемной активности радона в воздухе помещений Республики Беларусь проводятся интегральным методом пассивной трековой радиометрии с использованием твердотельных трековых ядерных детекторов альфа-частиц. Представлены результаты мониторинга радона в воздухе помещений в 36 населенных пунктах 9 административных районов Витебской обл. в октябре 2016 г. – феврале 2017 г., проведенного с целью увеличения статистики исследований по Витебской обл. При выборе населенных пунктов учитывались такие критерии, как разнообразие строительных материалов зданий, их тип, этажность. Общее количество обследованных помещений составило 264.

### Образец цитирования:

Жук ИВ, Лукашевич ЖА, Лисянович ТВ, Василевский ЛЛ, Хакимов ДА, Сосновский АВ. Исследование уровней содержания радона в воздухе зданий на территории некоторых административных районов Витебской области. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2021;2:61–66.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-61-66>

### For citation:

Zhuk IV, Lukashevich JA, Lisyonovich TV, Vasileuski LL, Hakimov DA, Sosnovskiy AV. Study of radon content in the air of premises on the territory of some administrative districts in the Vitebsk region. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2021;2:61–66. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-61-66>

### Авторы:

**Игорь Владимирович Жук** – кандидат технических наук; заведующий лабораторией экспериментальных ядерно-физических исследований и экспертных анализов радиоактивных материалов.

**Жанна Андреевна Лукашевич** – старший научный сотрудник лаборатории экспериментальных ядерно-физических исследований и экспертных анализов радиоактивных материалов.

**Татьяна Викторовна Лисянович** – научный сотрудник лаборатории экспериментальных ядерно-физических исследований и экспертных анализов радиоактивных материалов.

**Лев Леонидович Василевский** – инженер лаборатории экспериментальных ядерно-физических исследований и экспертных анализов радиоактивных материалов.

**Дилшод Абдухалимович Хакимов** – аспирант лаборатории экспериментальных ядерно-физических исследований и экспертных анализов радиоактивных материалов.

**Алексей Витальевич Сосновский** – аспирант кафедры радиационной медицины и экологии.

### Authors:

**Ihar V. Zhuk**, PhD (engineering); head of the laboratory of experimental nuclear physics research and expert analyses of radioactive materials.

[zhuk@sosny.bas-net.by](mailto:zhuk@sosny.bas-net.by)

**Jana A. Lukashevich**, senior researcher at the laboratory of experimental nuclear physics research and expert analyses of radioactive materials.

[lab13@sosny.bas-net.by](mailto:lab13@sosny.bas-net.by)

**Tatyana V. Lisyonovich**, researcher at the laboratory of experimental nuclear physics research and expert analyses of radioactive materials.

[lab13@sosny.bas-net.by](mailto:lab13@sosny.bas-net.by)

**Leu L. Vasileuski**, engineer at the laboratory of experimental nuclear physics research and expert analyses of radioactive materials.

[lab13@sosny.bas-net.by](mailto:lab13@sosny.bas-net.by)

**Dilshod A. Hakimov**, postgraduate student at the laboratory of experimental nuclear physics research and expert analyses of radioactive materials.

[lab13@sosny.bas-net.by](mailto:lab13@sosny.bas-net.by)

**Alyaksei V. Sosnovskiy**, postgraduate student at the department of radiation medicine and ecology.

[sosnovskiy\\_franc@mail.ru](mailto:sosnovskiy_franc@mail.ru)

Среди них 228 жилых и 36 общественных и производственных помещений. С использованием измеренных значений объемной активности радона и соответствующих методических указаний определены среднегодовые значения эквивалентной равновесной объемной активности для каждого помещения. Выполнена географическая привязка и пространственный анализ результатов измерений концентраций радона в жилых зданиях.

**Ключевые слова:** радон; объемная активность; мониторинг; Витебская область; твердотельные трековые детекторы.

## STUDY OF RADON CONTENT IN THE AIR OF PREMISES ON THE TERRITORY OF SOME ADMINISTRATIVE DISTRICTS IN THE VITEBSK REGION

I. V. ZHUK<sup>a</sup>, J. A. LUKASHEVICH<sup>a</sup>, T. V. LISYANOVICH<sup>a</sup>,  
L. L. VASILEUSKI<sup>a</sup>, D. A. HAKIMOV<sup>a</sup>, A. V. SOSNOVSKIY<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of National Academy of Sciences of Belarus,  
P. O. box 119, Minsk 220109, Belarus

<sup>b</sup>Belarusian State Medical University,  
83 Dziarzhynskaya Avenue, Minsk 220116, Belarus  
Corresponding author: I. Zhuk (zhuk@sosny.bas-net.by)

Unchanged concentrations of uranium-238, radium-226 in naturally soils and rocks are the source of radon. At least 40 % of territory of the Republic of Belarus is potentially radon risk.. At the same time radon and radioactive decay products make the main contribution to the radiation background of residential and industrial premises. It is cause of the systematic radon monitoring. Such systematic radon monitoring in the air of premises in the Republic of Belarus has been carried out by the scientific institution «JIPNR-Sosny» since 2002. The object of research is the volumetric activity of radon in the air of residential and industrial premises. In accordance with the recommendations of the International Commission on Radiation Protection, measurements of the volumetric activity of radon in the air of the premises of the Republic of Belarus are carried out by the integral method of passive track radiometry using solid-state track nuclear detectors of alpha particles. The results of radon monitoring in the air in 36 settlements of 9 administrative districts in the Vitebsk region in October 2016 – February 2017 are presented. It was carried out in order to increase the statistics of research for the Vitebsk region. A variety of building materials, their type, number of floors were taken into account as criteria for choosing of settlement.. The total number of studied premises was 264. It were 228 residential and 36 public and industrial premises among them. Annual average radon equivalent equilibrium volumetric activities were determined using the measured volumetric activities of radon and the corresponding methodological instructions. Geographical and spatial analyses of the radon concentrations measurements in residential premises were performed.

**Keywords:** radon; volumetric activity; monitoring; the Vitebsk region; solid state track detectors.

### Введение

В настоящее время международные и общественные организации большое внимание уделяют обсуждению и разработке подходов к обеспечению защиты населения от природного радона. Во многих странах мира (Швеция, Великобритания, Германия, Бельгия, США, Россия и др.) в течение последних 30–40 лет проводятся систематические радонометрические исследования и повторяют их ввиду многофакторной зависимости объемной активности радона от климатических, метеорологических и других условий с различной периодичностью [1]. Всемирная организация здравоохранения отнесла радон к соединениям, классифицируемым как канцероген для легких человека. Радон является вторым по значимости (после курения) фактором риска возникновения легочной онкопатологии. По разным оценкам авторитетных международных организаций, от 3 до 14 % случаев рака легких обусловлено облучением населения дочерними продуктами распада радона в жилищах. Учитывая данные обстоятельства, ограничение облучения населения радоном является важной научно-практической задачей, решение которой выходит за рамки исключительно радиологических аспектов и приобретает большое значение для здравоохранения [2].

В Республике Беларусь систематические исследования по мониторингу радона в воздухе помещений проводятся научным учреждением «ОИЭЯИ-Сосны» (в том числе совместно с другими организациями) с 2004 г. и продолжают до настоящего времени. В Беларуси не менее 40 % территории является потенциально радоноопасной, поскольку радон может поступать в помещения, расположенные в зонах тектонических разломов.

Облучение радоном относится к ситуации существующего облучения, поскольку его источником являются неизменные концентрации урана-238, радия-226, которые встречаются в природе в почвах и горных

породах. В результате распада радия-226 образующийся радон эманурует из земной коры и вследствие этого присутствует в атмосферном воздухе и внутри всех зданий, в том числе на рабочих местах. Наблюдается значительная вариабельность объемной активности радона в воздухе помещений, обусловленная главным образом геологией территории и факторами, влияющими на разницу давлений снаружи и внутри здания (скорость воздухообмена, отопление здания и метеорологические условия). Тогда как объемная активность радона, поступившего из почвы, быстро разбавляется в наружном воздухе, в закрытых помещениях этого не происходит, поэтому в зависимости от скорости вентиляции газообразный радон накапливается в здании. Деятельность человека может создавать или изменять пути поступления радона в помещения с помощью профилактических или корректирующих действий, то есть мер противорадоновой защиты. Следовательно, важным является проведение мониторинга радона в помещениях с применением разработанной стратегии и тактики [2].

На основании определений объемной активности радона в четвертичных отложениях, породах платформенного чехла и фундамента автором работ [3] построена схема районирования территории Беларуси по степени радоновой опасности покровных отложений (грунтов), содержание газа в которых в значительной степени влияет на его поступление в жилые и производственные помещения. Выделено пять типов территорий: потенциально радоноопасные, потенциально радоноопасные на отдельных площадях, потенциально радоноопасные на локальных участках, относительно радонобезопасные и радонобезопасные. Потенциально радоноопасные покровные отложения, составляющие около 2 %, встречаются в Гродненской, Витебской и Могилевской областях (объемная активность радона составляющих пород чехла и фундамента изменяется от 40 000 до 70 000 Бк/м<sup>3</sup> и более). Другие типы радоноопасных грунтов распространены значительно шире и составляют: потенциально радоноопасные на отдельных площадях – 15 % (значительная часть находится на территории Витебской обл.), потенциально радоноопасные на локальных участках – 40 %, относительно радонобезопасные – 35 % и радонобезопасные – 8 % территории Беларуси.

По данным, полученным научным учреждением «ОИЭЯИ-Сосны» до 2015 г., составлена карта радоновой опасности территории Республики Беларусь [4], согласно которой наблюдается существенная неоднородность в распределении концентрации радона по территории Беларуси. Пятна с потенциальным критическим уровнем радоновой опасности (200–400 Бк/м<sup>3</sup>) расположены на территории Витебской, Могилевской и Гродненской областей. Проведенный сравнительный анализ карты загрязнения территории Беларуси радиоцезием и картограммы потенциальной радоноопасности территории показал, что чернобыльское загрязнение и уровень радоноопасности территории являются разнонаправленными. Так, территории Витебской, Могилевской и Гродненской областей являются наименее загрязненными радиоцезием, поэтому зачастую дозы облучения населения от чернобыльских радионуклидов значительно меньше, чем уровень облучения от радона.

### Материалы и методы исследования

В соответствии с рекомендациями Международной Комиссии по Радиационной защите измерения объемной активности радона в воздухе помещений Республики Беларусь проводились интегральным методом пассивной трековой радиометрии с использованием твердотельных трековых ядерных детекторов альфа-частиц согласно методике [5]. В качестве детекторов использовалась нитроцеллюлозная пленка LR-115, тип 2, производства фирмы DOSIRAD (Франция), позволяющая применить относительно простой искровой способ счета треков на детекторах. При проведении мониторинга радона в воздухе зданий в Беларуси использовались интегральные трековые радиометры радона.

Интегральный метод пассивной трековой радиометрии измерения объемной активности радона имеет следующие преимущества: обеспечивает возможность одновременных массовых исследований помещений; обеспечивает получение информации о средней концентрации радона, интегрированной за длительный период экспозиции детекторов (до месяца и более), что позволяет учесть сезонные колебания эксгаляции радона из почвы и реальные режимы эксплуатации помещений (частоту проветривания помещений, условия вентиляции и др.); обеспечивает возможности экспрессного снятия информации с десятков и сотен тысяч детекторов; надежное сохранение информации во время длительных экспозиций.

Измерение объемной активности радона в воздухе помещений (согласно методике)<sup>1</sup> включает следующую последовательность операций: подготовка радонометров к экспонированию в воздухе исследуемых помещений; размещение радонометров в исследуемых помещениях; экспонирование радонометров в воздухе выбранных помещений; сбор радонометров после окончания экспонирования; разрядка

<sup>1</sup>МВИ. Мн. 1808-2002. Методика определения объемной активности радона в воздухе жилых и производственных помещений с использованием интегральных радонометров на основе твердотельных трековых детекторов альфа-частиц. Минск: [б. н.]; 2002. 18 с.

радонометров для последующей обработки твердотельных детекторов; химическая обработка (травление твердотельных детекторов; подсчет числа импульсов и определение плотности треков на твердотельных детекторах; расчет объемной активности радона в воздухе. Время экспозиции составляет 2–3 месяца. Большинство измерений в холодный сезон и на первых этажах зданий.

Химическая обработка трековых детекторов (травление) и автоматический подсчет треков на детекторах после экспозиции интегральных пассивных радонометров в воздухе исследуемых помещений проводились с использованием комплекса средств измерений объемной активности радона (КСИОАР), разработанного в Радиовом институте им. И. В. Хлопина. Комплекс средств измерений интегральной объемной активности радона (ОА) в воздухе трековым методом (КСИОАР 01) представлен на рис. 1.



Рис. 1. Фотография прибора для травления трековых детекторов – термостат ТРАЛ-1 (1 – травильное устройство; 2 – электронный блок), а также аппарата для автоматического искрового счета треков АИСТ-2В (3) и радонометра (4)

Fig. 1. Photo of the device for etching track detectors – hermostat TRAL-1 (1 – etching device; 2 – electronic unit), device for automatic spark counting of tracks AIST-2V (3) and radonmeter (4)

### Результаты исследования и их обсуждение

Для получения представляемых в настоящей работе данных организованы и проведены в октябре 2016 г. – феврале 2017 г. полевые экспедиции в 36 населенных пунктов 9 административных районов Витебской обл. для размещения, длительной экспозиции радонометров (1–3 месяца).

При выборе населенных пунктов учитывались следующие критерии: разнообразие строительных материалов зданий (дерево, кирпич, бетон и др.), их тип (жилые, административные, детские и др.), этажность (преимущественно одноэтажные жилые дома старой постройки, первый этаж многоэтажных зданий), а также выбирались те населенные пункты, в которых мониторинг радона ранее не проводился.

Общее количество обследованных помещений составило 264. Среди них 228 жилых и 36 общественных и производственных помещений. Основную часть (73,1 %) составляли одноэтажные сельские здания. Из общего количества обследованных зданий 23,5 % изготовлены из дерева, 59,1 % – из минерального сырья (кирпич, блоки, панель, бетон и т. п.), 17,4 % – из смешанных материалов (дерево, обложенное кирпичем, щиты и т. п.). 20,1 % зданий из обследованных имели центральное отопление, 26,9 % – печное и 52,7 % – местное (водяное, паровое, газовое).

Измеряемой величиной при мониторинге радона в помещениях является объемная активность радона ( $OA_{Rn}$ ). Нормируемым в Республике Беларусь параметром является среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность радона ( $\overline{ЭРОA_{Rn}}$ ), которая в эксплуатируемых жилых зданиях не должна превышать  $200 \text{ Бк/м}^3$ . При превышении указанного значения  $\overline{ЭРОA_{Rn}}$  необходимо проведение противорадоновых мероприятий, направленных на снижение данного показателя.

С использованием измеренных значений  $OA_{Rn}$  и соответствующих методических указаний определены среднегодовые значения  $\overline{ЭРОA_{Rn}}$  для каждого помещения. В табл. приведены данные по уровням  $OA_{Rn}$  и  $\overline{ЭРОA_{Rn}}$  в воздухе обследованных помещений районов Витебской обл.

Гистограмма распределения значений  $\overline{ЭРОA_{Rn}}$  для зданий, расположенных в обследованных районах Витебской обл., представлена на рис. 2. Здесь основную долю составляют помещения, для которых  $\overline{ЭРОA_{Rn}}$  не превышает  $100 \text{ Бк/м}^3$ .

Полученные результаты исследований свидетельствуют, что средние значения  $\overline{\text{ЭРОА}}_{\text{Rn}}$  в обследованных административных районах Витебской обл. варьируют от 31 до 97 Бк/м<sup>3</sup>. Значения  $\overline{\text{ЭРОА}}_{\text{Rn}}$  более 100 Бк/м<sup>3</sup> зафиксированы в 35 помещениях, составляющих 13 % от общего количества осмотренных помещений. Превышение нормируемого законодательством Республики Беларусь значения  $\overline{\text{ЭРОА}}_{\text{Rn}}$  более 200 Бк/м<sup>3</sup> наблюдается в 4 помещениях или в 2 % случаев. Оно зафиксировано в жилых домах Россонского (201 Бк/м<sup>3</sup>), Браславского (793 и 310 Бк/м<sup>3</sup>) и Оршанского (318 Бк/м<sup>3</sup>) районов. В указанных помещениях необходимо проведение противорадиационных мероприятий, направленных на снижение уровня объемной активности радона.

Таблица

Распределение значений  $\text{OA}_{\text{Rn}}$  и  $\overline{\text{ЭРОА}}_{\text{Rn}}$  в воздухе помещений населенных пунктов Витебской обл.

Table

Distribution of  $\text{OA}_{\text{Rn}}$   $\overline{\text{EEVA}}_{\text{Rn}}$  values in indoor air in settlements of the Vitebsk region

Административный район	Количество обследованных населенных пунктов, штук	Объем выборки исследованных помещений, штук	Значение $\text{OA}_{\text{Rn}}$ , Бк/м <sup>3</sup>		Значение $\overline{\text{ЭРОА}}_{\text{Rn}}$ , Бк/м <sup>3</sup>		Доля помещений с $\overline{\text{ЭРОА}}_{\text{Rn}}$ , %	
			Среднее	Максимальное	Среднее	Максимальное	>100 Бк/м <sup>3</sup>	>200 Бк/м <sup>3</sup>
Россонский	4	40	136	405	69	201	23	3
Браславский	4	40	192	1620	97	793	25	5
Верхнедвинский	5	40	108	360	56	179	15	0
Глубокский	4	19	119	295	61	147	11	0
Шумилинский	2	7	91	135	48	69	0	0
Дубровенский	4	32	57	230	31	115	3	0
Голочинский	4	34	88	345	46	171	9	0
Оршанский	4	29	91	645	47	318	3	3
Полоцкий	5	23	107	335	58	167	13	0
В целом по Витебской обл.	36	264	115	1620	59	793	13	2

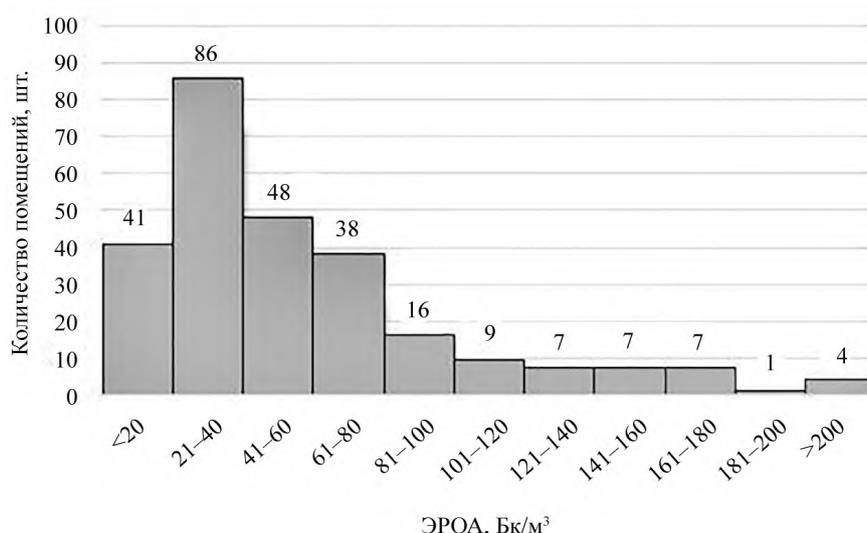


Рис. 2. Гистограмма распределения значений  $\overline{\text{ЭРОА}}_{\text{Rn}}$  для зданий, расположенных в обследованных районах Витебской обл.

Fig. 2. Histogram of the distribution of values  $\overline{\text{EEVA}}_{\text{Rn}}$  for buildings located in the surveyed districts of the Vitebsk region

Для представленных в статье данных выполнена географическая привязка и пространственный анализ результатов измерений концентраций радона в жилых помещениях, что позволит актуализировать карты

уровней среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности радона в воздухе жилых зданий на территории Беларуси.

### Заключение

По данным на 01.12.2020, общее количество обследованных зданий на территории Беларуси составляет 5543, из них 4264 – жилые дома. За 2016–2020 гг. было проверено 919 помещений, расположенных в 207 населенных пунктах 46 районов всех областей Беларуси, выбранных для проведения измерений. Превышение нормируемого законодательством Республики Беларусь значения  $\overline{ЭРОA_{\text{Рн}}}$  200 Бк/м<sup>3</sup> зафиксировано в 125 (2,3 %) зданиях на территории Беларуси, из которых 83 помещения являются жилыми.

Проводимые на территории Беларуси радоновые исследования имеют важное социальное значение, поскольку направлены на формирование базы данных по уровням объемной активности радона в воздухе помещений.

### Библиографические ссылки

1. Ярошевич ОИ, Карабанов АК, Конопелько МВ и др. Исследования по проблемам радона в Беларуси и других странах Европы. *Вестник ФФИ*. 2013;4:101–117.
2. Карабанов АК, Жук ИВ, Ярошевич ОИ и др. Радон: здоровье, опасность, защитные мероприятия. *Наука и инновации*. 2013;4(122):63–67.
3. Матвеев АВ. Районирование территории Беларуси по степени радоновой опасности грунтов. *Доклады НАН Беларуси*. 2016; 60(5):108–112.
4. Чунихин ЛА, Чеховский АЛ, Дроздов ДН. Карта радоновой опасности территории Республики Беларусь. *Радиационная гигиена*. 2016;9(4):43–46.

### References

1. Jaroshevich OI, Karabanov AK, Konopel'ko MV, et al. *Issledovaniya po problemam radona v Belarusi i drugikh stranakh Yevropy* [Studies on the radon problem in Belarus and other countries of Europe] *Vestnik Fonda fundamental'nyh issledovanij* [Bulletin of the Foundation for Fundamental Research]. 2013;4:101–117. Russian.
2. Karabanov AK, Zhuk IV, Jaroshevich OI, et al. *Radon: zdorov'ye, opasnost', zashchitnyye meropriyatiya* [Radon: health, hazard, protective measures], *Nauka i innovacii* [Science and Innovation]. 2013;4(122):63–67. Russian.
3. Matveev AV. *Rayonirovaniye territorii Belarusi po stepeni radonovoy opasnosti gruntov* [Zoning of the territory of Belarus in order of radon hazard of the soils]. *Doklady NAN Belarusi* [The reports of the NASB]. 2016;60(5):108–112. Russian.
4. Chunihin LA, Chehovskij AL, Drozdov DN. *Karta radonovoy opasnosti territorii Respubliki Belarus'* [The radon hazard map of the Republic of Belarus]. *Radiacionnaja gigiena* [Radiation hygiene]. 2016;9(4):43–46. Russian.

Статья поступила в редколлегию 12.04.2021.  
Received by editorial board 12.04.2021.

# МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

# MEDICAL ECOLOGY

УДК 616.24:57.086.8

## ПОЛУЧЕНИЕ КУЛЬТУР АЛЬВЕОЛОЦИТОВ I И II ТИПА ДЛЯ МЕДИКО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М. Ю. ЮРКЕВИЧ<sup>1)</sup>, П. В. АЛЬХОВИК<sup>1)</sup>, А. А. ЦАРИК<sup>1)</sup>, М. А. КОХНЮК<sup>1)</sup>

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

Альвеолярный эпителий представляет собой динамическую ткань, состоящую из клеток I и II типа, покрывающую более 99 % внутренней поверхности легких и активно реагирующую на различные эндогенные и экзогенные стимулы. Представлена технология выделения альвеолоцитов I и II типа, заключающаяся в механической дезагрегации ткани с последующей обработкой эксплантов 0,25%-ным раствором трипсина в сочетании с фильтрованием клеточной суспензии через поры диаметром 100 мкм и 50 мкм. При двумерном статическом культивировании визуализировались жизнеспособные активно пролиферирующие округлые клетки и крупные альвеолярные эпителиоциты с кубоидной морфологией, производящие сурфактантные белки.

**Ключевые слова:** культуры клеток; альвеолоциты I и II типа; метод ферментативной дезагрегации; морфология; клеточный выход; жизнеспособность.

**Благодарность.** Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования Республике Беларусь на 2021 год, № ГР 20211338 от 17.05.2021.

### Образец цитирования:

Юркевич МЮ, Альховик ПВ, Царик АА, Кохнюк МА. Получение культур альвеолоцитов I и II типа для медико-экологических исследований. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2021;2:67–73. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-67-73>

### For citation:

Yurkevich MYu, Alchovik PV, Tsarik AA, Kokhniuk MA. Cultures of alveolocyttes I and II type for medical and ecological research. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2021;2:67–73. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-67-73>

### Авторы:

**Мария Юрьевна Юркевич** – кандидат биологических наук; доцент кафедры иммунологии.

**Павел Владимирович Альховик** – студент факультета экологической медицины.

**Анастасия Александровна Царик** – студентка факультета экологической медицины.

**Марина Андреевна Кохнюк** – студентка факультета экологической медицины.

### Authors:

**Mariya Yu. Yurkevich**, PhD (biology); associate professor at the immunology department.

[marija4567@gmail.com](mailto:marija4567@gmail.com)

**Pavel V. Alchovik**, student at the faculty of environmental medicine.

[qwel11x@yandex.by](mailto:qwel11x@yandex.by)

**Anastasia A. Tsarik**, student at the faculty of environmental medicine.

[czarik01@inbox.ru](mailto:czarik01@inbox.ru)

**Marina A. Kokhniuk**, student at the faculty of environmental medicine.

[mkokhnyuk01@mail.ru](mailto:mkokhnyuk01@mail.ru)

## CULTURES OF ALVEOLOCYTES I AND II TYPE FOR MEDICAL AND ECOLOGICAL RESEARCH

M. Yu. YURKEVICH<sup>a</sup>, P. V. ALCHOVIK<sup>a</sup>, A. A. TSARIK<sup>a</sup>, M. A. KOKHNIUK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,  
23/1 Daihabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

Corresponding author: M. Yu. Yurkevich (marija4567@gmail.com)

The alveolar epithelium is a dynamic tissue, consisting of cells of types I and II, covering more than 99 % of the lung inner surface and actively responding to various endogenous and exogenous stimuli. The technology of alveolocyte isolation is presented, which consists in mechanical disaggregation of tissue with subsequent processing of the resulting explants with 0.25 % trypsin solution in combination with filtration of the cell suspension through pores with a diameter of 100  $\mu\text{m}$  and 50  $\mu\text{m}$ . In two-dimensional static culture viable actively dividing rounded cells and large alveolar epithelial cells with cuboid or polygonal morphology, producing surfactant proteins, were visualized.

**Keywords:** cell culture; alveolocytes I and II types; enzymatic disaggregation method; morphology; cell output; viability.

**Acknowledgements.** This work was supported by the grant of the Ministry of Education of the Republic of Belarus for 2021, grant no. GP 20211338 from 17.05.2021.

### Введение

Легкие являются одним из наиболее важных органов, подверженных прямому воздействию факторов окружающей среды. Они различаются как по своей природе, так и по механизмам действия и включают химические и биологические компоненты. При дыхании воздух с взвешенными нано- и микрокомпонентами проходит через альвеоларно-капиллярную структуру, которая представлена эндотелиальными клетками и альвеоларными эпителиоцитами, а также их отдельными базальными мембранами, слитыми для облегчения диффузии [1].

Альвеоларный эпителий состоит из трех типов клеток: альвеоларные эпителиальные клетки I и II типа, альвеоларное макрофаги. Клетки I типа образуют эпителиальную часть аэрогематического барьера и участвуют в газообмене. Клетки II типа синтезируют и секретируют поверхностно-активные вещества, транспортируют ионы, участвуют в иммунных реакциях, а также в ответ на повреждение функционируют как клетки-предшественники [2; 3].

Повреждение альвеоларного эпителия лежит в основе ряда патологических состояний. Альвеоларные эпителиальные клетки являются мишенью для проникновения и репликации вирусов. Так, вирус SARS-CoV-2, вызвавший пандемию коронавирусной инфекции во всем мире, инфицирует альвеоларные эпителиальные клетки за счет связывания с их рецептором к ангиотензинпревращающему ферменту-2 [4]. Опосредованное инфекционными, химическими и/или иными факторами острое нарушение аэрогематического барьера сопровождается частичным или полным разрушением и десквамацией альвеоларных эпителиоцитов, миграцией иммунокомпетентных клеток, гиперпродукцией цитокинов и реактивных форм кислорода, что является причиной развития неуправляемых цитотоксических реакций, клинически проявляющихся острым респираторным дистресс-синдромом [5; 6]. Нарушение структуры альвеоларной эпителиальной ткани, обнажение базальной мембраны, образование фибриновых волокон и формирование так называемых «гиалиновых мембран» является причиной развития легочного фиброза [7]. Патологические изменения синтеза сурфактанта характерны для ряда тяжелых форм заболеваний легких, в том числе муковисцидоза и идиопатического фиброза легких [8].

Культура альвеоларных эпителиальных клеток является уникальной системой, позволяющей *in vitro* изучить функциональное состояние клеток в норме, при воздействии факторов окружающей среды, а также смоделировать течение различных патологических состояний. Поскольку аэрогематический барьер, образованный альвеоларными эпителиоцитами, имеет решающее значение для доставки лекарственных средств в легкие, клеточные культуры могут использоваться для проведения стандартизированных исследований токсичности и транспорта различных соединений [9; 10]. Кроме того, получение жизнеспособных и функционально состоятельных культур альвеоларных эпителиоцитов является основой для разработки новых подходов в регенеративной медицине заболеваний легких [11].

Большинство существующих клеточных моделей, имитирующих аэрогематический барьер, представлены опухолевыми клетками или иммортализованными клеточными линиями, полученными из трахеального / бронхиального эпителия легких человека и животных. Использование данных культур ограничено вследствие высокой вероятности генетических трансформаций и отсутствия в них всего спектра функций, характерного для альвеоларных эпителиоцитов [10]. В связи с этим огромный интерес представляет разработка методов получения жизнеспособных и функционально активных альвеолоцитов из нативной легочной ткани.

Целью данного исследования являлась оптимизация технологии получения культур альвеолоцитов I и II типа путем ферментативной дезагрегации легочной ткани, а также характеристика клеток в условиях стандартного монослойного культивирования.

## Материалы и методы исследования

Экспериментальное исследование проводили с соблюдением положений Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов и в научных целях (Страсбург, 1991 г.), и в соответствии с постановлением Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 21.05.2010 №36 «Ветеринарно-санитарные правила по приему, уходу и вскрытию подопытных животных в вивариях научно-исследовательских институтов, станциях, лабораториях, учебных заведениях, а также в питомниках».

**Материалы и оборудование.** Вода дистиллированная, подготовленная по требованиям ГОСТ 67092-72, 0,9%-ный раствор натрия хлорида (физиологический раствор, РУП «Белмедпрепараты», РБ), коллагеназа IV типа («Sigma», Германия), 0,25%-ный раствор трипсин-этилендиаминтетрауксусной кислоты («Gibco», США), эмбриональная телячья сыворотка («Capricorn Scientific», Германия), минимальная среда Игла с низким содержанием глюкозы, модифицированная по способу Дульбекко (DMEM, «Gibco», США), смесь антибиотиков – антимикотика (100 Ед/мл бензилпенициллин натрия, 100 Ед/мл стрептомицин сульфата, 100 Ед/мл неомицин сульфата («Lonza», США), L-глутамин («Lonza», США), набор «Annexin V-Fitc Apoptosis Detection Kit» («BD Pharmingen», США), анти-CCR2 моноклональные антитела, меченные DyLight500 («Invitrogen», США), 0,3%-ный раствор судана III в 70%-ном этаноле (РФ), культуральные чашки Петри, пробирки культуральные на 15 и 50 мл, фильтры с диаметром пор 50 мкм и 100 мкм, медицинские инструменты: пинцеты, зажимы, хирургические ножницы.

Ламинарный бокс II класса защиты (ОДО «Белаквилон», РБ), CO<sub>2</sub>-инкубатор CO2CELL 50 (MMM Group, Германия), центрифуга лабораторная Liston C 2210 (РФ), инвертированный флуоресцентный микроскоп BS-2036F («BestScore», КНР), проточный цитометр CytoFLEX («Beckman Coulter», США), дозаторы автоматические («Thermo Scientific», РФ).

**Выделение альвеолоцитов I и II типа.** Основные этапы выделения альвеолярных эпителиальных клеток отражены на рис. 1.

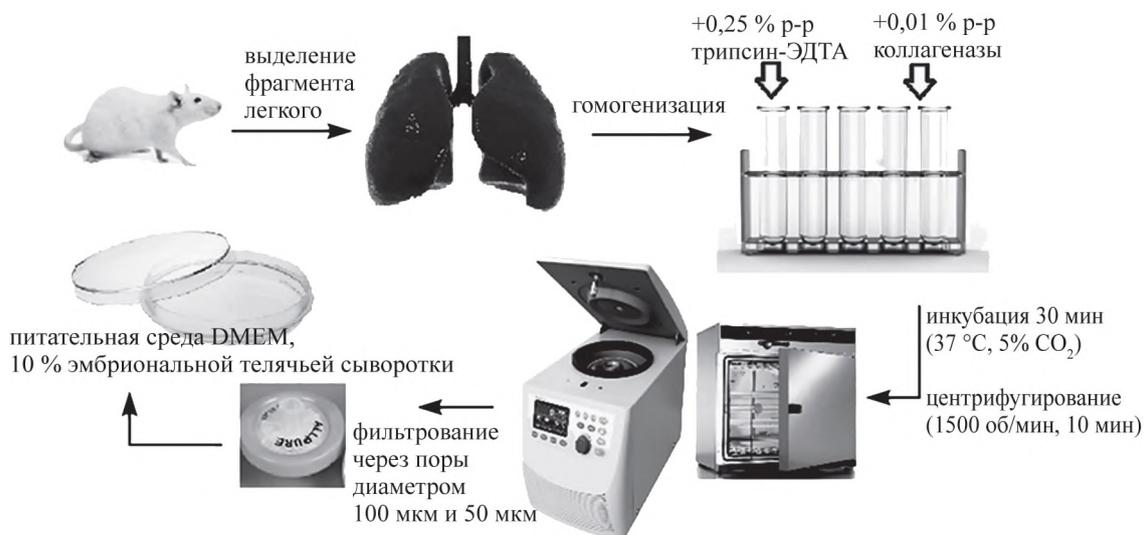


Рис. 1. Основные этапы выделения альвеолоцитов I и II типа методом механической и ферментативной disaggregation ткани легкого

Fig. 1. The key steps of an optimized method for the isolation of alveolocytes I and II types by mechanical and enzymatic disaggregation of lung tissue

Лабораторных беспородных половозрелых крыс, масса тела которых 270–320 г. ( $n = 7$ ), вводили в наркоз путем интракардиального введения раствора тиопентала натрия (45 мг/кг веса). Проводили продольную лапаротомию и осуществляли забор обескровленного легкого. Легочную ткань механически измельчали до эксплантов размером 2–3 мм в фермент-содержащем растворе и инкубировали в течение 30 мин при 37 °С в условиях постоянного перемешивания. Для ферментативной disaggregation ткани использовали два подхода: 0,01%-ный раствор коллагеназы IV типа или 0,25% раствор трипсин-этилендиаминтетрауксусной кислоты. Ферментативную активность инактивировали путем центрифугирования полученных суспензий в физиологическом растворе с 10 % инактивированной эмбриональной телячьей сывороткой в течение 10 мин при 15000 об/мин. К осадкам добавляли физиологический раствор с 5 % эмбриональной телячьей сывороткой, суспензии последовательно пропускали через фильтры, диаметр пор которых 100 мкм и 50 мкм, и дважды центрифугировали 10 мин при 1500 об/мин.

*Культивирование альвеолярных эпителиальных клеток.* Клеточную суспензию высевали в адгезивные чашки Петри в культуральную среду DMEM, содержащую 10 % эмбриональной телячьей сыворотки, 2мМ L-глутамина, смесь антибиотиков – антимикотика. Клетки культивировали при 37 °С в условиях 5 % CO<sub>2</sub>. Первая замена культуральной среды осуществлялась на 2 день культивирования, впоследствии среда заменялась каждый 3-й день. Все манипуляции с клетками выполняли со строгим соблюдением правил стерильности в ламинарном боксе II класса защиты. Мониторинг клеточных культур и визуализацию роста *in vitro* осуществляли с помощью фазово-контрастной микроскопии.

*Оценка пролиферативного потенциала клеток.* Выделенные альвеолоциты культивировали в течение 4 дней в стандартных условиях в концентрациях  $8 \times 10^5$  и  $16 \times 10^5$  клеток/лунку 24-луночного планшета. По истечении времени культивирования подсчитывалась концентрация клеток и рассчитывались показатели времени (ВУП) и частоты (ЧУП) удвоения популяций по следующим формулам:

$$\text{ЧУП} = \log_{10}(n/N) \times 3,33,$$

$$\text{ВУП} = \text{время роста культуры (дни)} / \text{ЧУП},$$

где  $n$  – число клеток после культивирования,  $N$  – число клеток для посева.

*Метод проточной цитометрии.* Жизнеспособность клеток оценивали по уровню связывания клетками пропидий йодида и антител к аннексину V, меченных фикоэритрином (Fic). Для характеристики пролиферативной активности клетки инкубировали 30 мин при комнатной температуре с антителами к ССР2, меченными DyLight500 (разведение 1:50). В качестве контроля использовали пробы, которые инкубировали только с изотипическими антителами. Регистрацию результатов проводили с помощью проточного цитофлуориметра.

*Статистические методы.* Статистическая обработка результатов осуществлялась в пакете прикладных программ STATISTICA 8.0. Полученные результаты представлены в виде медианы, нижнего и верхнего квартиля (25 % ÷ 75 % процентиля).

## Результаты исследования и их обсуждение

Для выделения альвеолоцитов I и II типа используются разнообразные подходы к дезагрегации ткани легкого: механические, химические и ферментативные, а также их сочетание. Методы отличаются по клеточному выходу, сохранности ультраструктуры, жизнеспособности клеток и предусматривают использование различных ферментов (трипсин, коллагеназа, эластаза, проназа, ДНКазы либо сочетание протеаз), фильтров с определенным диаметром пор, а также включение дополнительной стадии центрифугирования на градиенте плотности. Кроме того, изолированные альвеолярные эпителиоциты получают методами магнитной сепарации или проточной цитометрии с флуоресцентным сортированием клеток [3; 10; 12; 13].

Эпителиальные клетки достаточно хрупкие и легко повреждаются, поэтому проводится их быстрая изоляция (вся процедура не должна превышать 4 ч) при бережном обращении с тканями. Выделение клеток из легких лабораторных животных осуществлялось путем механической и ферментативной дезагрегации ткани различными протеолитическими ферментами с коллагенолитической активностью: 0,25%-ный раствор трипсина и 0,01%-ный раствор коллагеназы IV типа. Согласно данным ряда исследований, снижение температуры до 15 °С и времени инкубации с ферментами до 15 мин влияет на выход клеток из ткани легкого, снижая данный показатель на 50 %, при этом повышение инкубационного периода оказывает негативное влияние на клеточную жизнеспособность [12]. Таким образом, оптимальными условиями для выделения достаточного количества жизнеспособных альвеолоцитов явились время инкубации с ферментами 30 мин и осуществление всех этапов при 37 °С. После выделения клеток с использованием относительно простого метода ферментативной обработки легочной ткани важным этапом является избавление от примеси клеток. Установлено, что добавление этапа фильтрации клеточных суспензий через поры диаметром 100 и 50 мкм обеспечивает эффективное удаление клеточного дебриса и крупных конгломератов ткани. Количество жизнеспособных (негативных по аннексину V и пропидий йодиду) клеток во всех полученных культурах колебалось от 91,0 до 98,5 % и составляло по медиане 94,6 (92,1 ÷ 97,9) % (рис. 2 а, б).

Клеточный выход при использовании трипсина соответствовал  $6,8 (5,4 \div 7,5) \times 10^6$  альвеолярных эпителиоцитов/грамм ткани легкого и статистически значимо превышал аналогичный показатель при коллагеназо-опосредованном выделении клеток ( $3,9 (2,8 \div 5,0) \times 10^6$  клеток/г),  $p=0,02$ ,  $U$ -критерий Манна–Уитни. Таким образом, несмотря на то что альвеолярные эпителиоциты составляют относительно небольшой процент всех клеток легких (около 20 %), обработка ткани легких трипсином эффективно высвобождает эпителиальные клетки из подлежащей базальной мембраны, оставляя большую часть интерстициальных и сосудистых компартментов нетронутыми.

Клетки культивировали в стандартных условиях в питательной среде DMEM, содержащей 10 % эмбриональной телячьей сыворотки, 1 % смеси антибиотиков-антимикотика, 1 % аминокислоты L-глутамин. Большая часть изолированных клеток прикреплялась к адгезивному лабораторному пластику в течение

48 ч, при этом визуализировались одиночные клетки или клеточные конгломераты, находящиеся в суспензии. Первичные клеточные культуры обладали морфологической гетерогенностью. В незначительном количестве в культурах клеток обнаруживались фибробластоподобные медленно пролиферирующие клетки с более или менее неравномерной по плотности цитоплазмой и крупным ядром. При этом, в ходе дезагрегации легочной ткани сериновой протеазой (трипсином) количество клеток с фибробластоподобной морфологией не превышало 1% от общего количества клеток в культуре (рис. 2 в), тогда как при использовании коллагеназы IV типа доля данных клеток в культурах возрастала и составляла 5–10% (рис. 2 г). В некоторых полученных культурах визуализировались 1–2 колонии полигональных, плотно прилегающих друг к другу клеток, морфологически похожих на эндотелиоциты. Данные клетки быстро откреплялись от лабораторного пластика и погибали в первые дни культивирования, так как для поддержания их пролиферативной активности *in vitro* необходимо присутствие в культуральной среде ряда факторов, в частности, сосудистого эндотелиального фактора роста (VEGF).

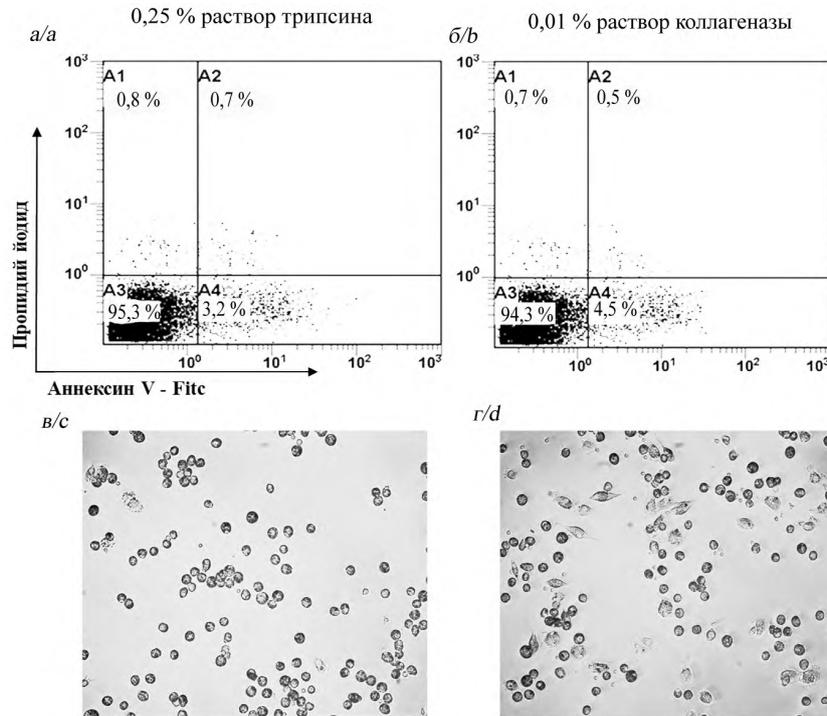


Рис. 2. Репрезентативные диаграммы проточной цитометрии, отражающие жизнеспособность клеток (а, б), и морфология (в, г, ув. 20 х) культур альвеолоцитов, полученных в результате обработки ткани легкого растворами трипсина (а, в) и коллагеназы (б, г)

Fig. 2. Representative flow cytometry diagrams of cell viability (a, b) and morphology (c, d, 20 x) of alveolocyte cultures obtained as a result of lung tissue digestion with solutions of trypsin (a, c) and collagenase (b, d)

Морфологические особенности клеточных культур, полученных из ткани легкого с использованием трипсина, отражены на рис. 3. Преобладающее число клеток характеризовались округлой морфологией с сохраняющейся полярностью и четко очерченным центрально расположенным ядром. Размер клеток, определяемый как максимально возможное расстояние между двумя точками видимой на фотографии клеточной проекции, варьировал в пределах 10–15 мкм. Данные морфологические особенности характерны для альвеолярных эпителиальных клеток I типа, которые покрывают около 95% поверхности альвеол и выполняют барьерную функцию [2; 3; 10; 13]. В культурах также визуализировались клетки крупных размеров (15–20 мкм), кубовидной формой с небольшим центрально расположенным ядром. Данный тип клеток содержал множество цитоплазматических вакуолей и пластинчатых телец (органелл, в которых накапливается и хранится сурфактант [14]), позитивно окрашиваемых органическим азокрасителем – суданом III, что позволяет отнести их к секреторным альвеолярным эпителиоцитам II типа. Данные клетки занимают 3–5% альвеолярной поверхности, активно накапливают и продуцируют сурфактантный комплекс, представляющий собой фосфолипид, в состав которого входят насыщенные и ненасыщенные жирные кислоты со свободной валентностью. Сурфактант стабилизирует мелкие дыхательные пути, обладает антидегидратационной и газообменной функциями, осуществляют антиоксидантную защиту альвеолярной стенки, а также препятствует проникновению к эпителию экзогенных гидрофильных молекул, улучшает клиренс и модулирует активность клеток иммунной системы [2; 3; 10; 12].

Частота удвоения популяций альвеолярных эпителиальных клеток составляла 1,8 ( $1,7 \div 2,1$ ) раз. Время удвоения популяций соответствовало 2,4 ( $2,0 \div 2,9$ ) дням, что отражает пролиферативную активность клеток при стандартном монослойном культивировании. При этом концентрация клеток, используемая при посеве, не оказывала влияния на интенсивность клеточной пролиферации.

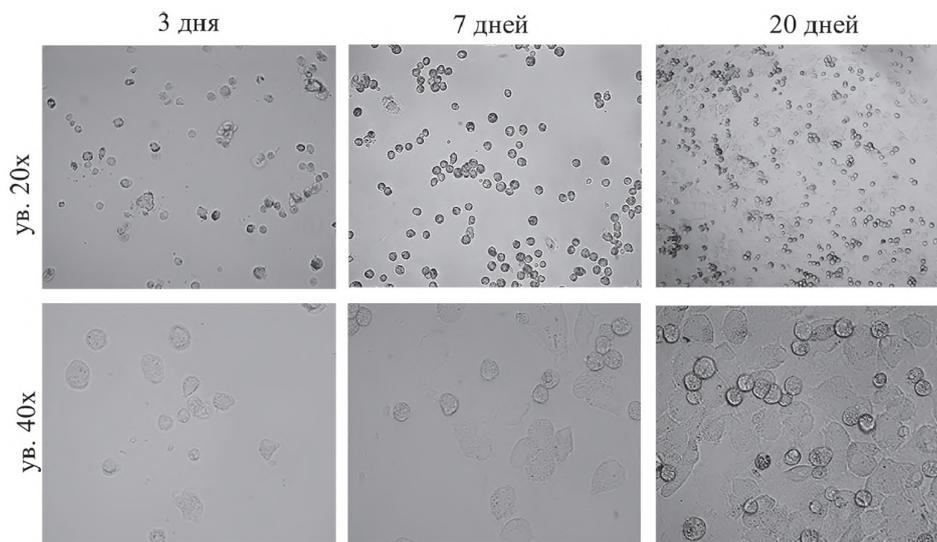


Рис. 3. Морфология первичных культур альвеолоцитов, выделенных путем дезагрегации ткани легкого 0,25 % раствором трипсина

Fig. 3. Morphology of alveolocyte cultures isolated by disaggregation of lung tissue with 0.25 % trypsin solution

Альвеолярный эпителий подвергается воздействию большого количества вдыхаемого воздуха, содержащего загрязнители и патогены, что приводит в ряде случаев к деструкции ткани и нарушению процессов газообмена. При этом функцию легких можно восстановить при активации процессов реэпителизации. Повреждение эпителиальных клеток легочной ткани сопровождается продукцией белка хемотаксиса моноцитов (MCP-1), который, взаимодействуя с димерным мембранным интегрином CCR2, запускает процессы репарации, индуцирует пролиферацию клеток, гаптотаксис и восстановление монослоя [15; 16].

На рис. 4 представлены репрезентативные гистограммы проточной цитометрии, отражающие уровень экспрессии CCR2 в альвеолярных эпителиоцитах. Показано, что более 80 % клеток ( $88,9 (81,4 \div 95,6) \%$ ), изолированных из легочной ткани путем механической и ферментативной дезагрегации, экспрессируют CCR2, что отражает их функциональную активность и способность к пролиферативной репарации. Согласно данным М. С. Lundien и соавт. (2002), эпителиальные клетки альвеол активно пролиферируют в ответ на MCP-1 и обладают гаптотаксической миграцией, тогда как антитела к MCP-1 блокируют пролиферативную активность клеток [15]. Р. Christensen и соавт. (2004) установлена экспрессия мРНК CCR2 в альвеолярных эпителиальных клетках. При этом первичные альвеолярные эпителиоциты, выделенные из легких мышей, лишенных CCR2, не отвечали на MCP-1 и характеризовались сниженными пролиферативным и репаративным потенциалами [16].

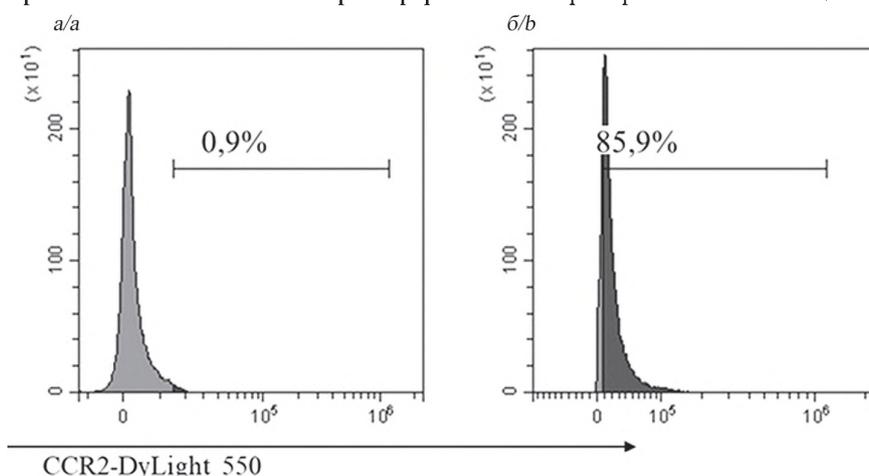


Рис. 4. Репрезентативные гистограммы проточной цитометрии, отражающие уровень экспрессии CCR2 в альвеолярных эпителиальных клетках: *a* – изотипический (негативный) контроль, *b* – экспрессия CCR2

Fig. 4. Representative flow cytometry histograms of CCR2 expression in alveolar epithelial cells: *a* – isotypic (negative) control, *b* – CCR2 expression

## Заключение

Метод, включающий механическую дезагрегацию ткани легкого с последующей обработкой полученных эксплантов 0,25%-ным раствором трипсина в сочетании с фильтрованием клеточной суспензии через поры диаметром 100 мкм и 50 мкм, позволяет выделить достаточное количество жизнеспособных альвеолоцитов I и II типа  $(6,8(5,4\div 7,5)\times 10^6$  клеток/грамм). В стандартных условиях в культурах визуализируются активно делящиеся округлые альвеолярные эпителиоциты и клетки с кубоидной морфологией, характеризующиеся высокой секреторной активностью. Культуры альвеолоцитов являются уникальной модельной системой для изучения патогенетических процессов на молекулярно-клеточном уровне. Они используются с целью оценки эффективности лекарственных средств и разработки новых терапевтических подходов, а также могут применяться в регенеративной медицине. Перспективным направлением дальнейшего исследования клеточных культур является поиск специфических маркеров для альвеолоцитов I и II типа и определение их роли в физиологических процессах. Кроме того, оптимизированный метод получения культур альвеолярных эпителиальных клеток является фундаментальной основой для разработки трехмерных культур клеток легкого, имитирующих микроокружение и архитектуру нативной ткани.

## Библиографические ссылки / References

1. Olivieri D, Scoditti E. Impact of environmental factors on lung defences. *European Respiratory Review*. 2005;14:51–56. DOI: 10.1183/09059180.05.00009502.
2. Mercer RR, Russell ML, Roggli VL, Crapo JD. Cell number and distribution in human and rat airways. *Journal Respir Cell Molecular Biology*. 1994;10:613–624. DOI: 10.1165/ajrcmb.10.6.8003339.
3. Gonzalez RF, Dobbs L. G. Isolation and culture of alveolar epithelial type I and type II cells from rat lungs. *Methods Molecular Biology*. 2013;945:145–159. DOI: 10.1007/978-1-62703-125-7\_10.
4. Carcaterra M, Caruso C. Alveolar epithelial cell type II as main target of SARS-CoV-2 virus and COVID-19 development via NF-Kb pathway deregulation: A physio-pathological theory. *Medical Hypotheses*. 2021;146:110412. DOI:10.1016/j.mehy.2020.110412.
5. Miura TA. Respiratory epithelial cells as master communicators during viral infection. *Current Clinical Microbiology Reports*. 2019; 6:10–17. DOI: 10.1007/s40588-019-0111-8
6. Zhang H, Cui Y, Zhou Z, Ding Y, Nie H. Alveolar Type 2 Epithelial Cells as Potential Therapeutics for Acute Lung Injury/Acute Respiratory Distress Syndrome. *Current Pharmaceutical Design*. 2019;25(46):4877–4882. DOI: 10.2174/1381612825666191204092456.
7. Parimon T, Yao C, Stripp BR, Noble PW, Chen P. Alveolar Epithelial Type II Cells as Drivers of Lung Fibrosis in Idiopathic Pulmonary Fibrosis. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(7):2269. DOI:10.3390/ijms21072269.
8. Whitsett JA, Wert SE, Weaver TE. Diseases of pulmonary surfactant homeostasis. *Annual Review of Pathology*. 2015;10:371–393. DOI:10.1146/annurev-pathol-012513-104644.
9. Hiemstra PS, Grootaers G, van der Does AM, Krul CAM, Kooter IM. Human lung epithelial cell cultures for analysis of inhaled toxicants: lessons learned and future directions. *Toxicology in vitro*. 2018;47:137–146. DOI: 10.1016/j.tiv.2017.11.005.
10. Daum N, Kuehn A, Hein S, Schaefer UF, Huwer H, Lehr CM. Isolation, cultivation, and application of human alveolar epithelial cells. *Methods Molecular Biology*. 2012;806:31–42. DOI:10.1007/978-1-61779-367-7\_3.
11. Basil MC, Katzen J, Engler AE, Guo M, Herriges MJ, Kathiriya JJ, Windmueller R, Ysasi AB, et al. The cellular and physiological basis for lung repair and regeneration: past, present, and future. *Cell Stem Cell*. 2020;26(4):482–502. DOI:10.1016/j.stem.2020.03.009.
12. Lee DF, Salguero FJ, Grainger D. Isolation and characterisation of alveolar type II pneumocytes from adult bovine lung. *Scientific Reports*. 2018;8:e.11927. DOI:10.1038/s41598-018-30234-x.
13. Wang S., Hubmayr R. D. Type I alveolar epithelial phenotype in primary culture. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*. 2011;44(5):692–699. DOI:10.1165/rcmb.2009-0359.
14. Schneider JP, Pedersen L, Mühlfeld C, Ochs M. Staining histological lung sections with Sudan Black B or Sudan III for automated identification of alveolar epithelial type II cells. *Acta Histochem*. 2015;117(8):675–80. DOI:10.1016/j.acthis.2015.10.005.
15. Lundien MC, Mohammed KA, Nasreen N, Tepper RS, et al. Induction of MCP-1 expression in airway epithelial cells: role of CCR2 receptor in airway epithelial injury. *Journal of Clinical Immunology*. 2002;22(3):144–52. DOI: 10.1023/a:1015420029430. PMID: 12078856.
16. Christensen PJ, Du M, Moore B, Morris S, et al. Expression and functional implications of CCR2 expression on murine alveolar epithelial cells. *American Journal of Physiology – Lung Cellular and Molecular Physiology*. 2004;286(1):68–72. DOI:10.1152/ajplung.00079.2003.

Статья поступила в редакцию 22.04.2021.  
Received by editorial board 22.04.2021.

---

---

# ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

---

## INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

---

---

УДК 634.737:581.5:581.522.4(476)

### ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВЕГЕТАТИВНОГО РАЗМНОЖЕНИЯ НА АНТИОКСИДАНТНЫЙ КОМПЛЕКС ПЛОДОВ СОРТОВ *VACCINIUM CORYMBOSUM* L.

Ж. А. РУПАСОВА<sup>1)</sup>, В. С. ЗАДАЛЯ<sup>1)</sup>, О. В. ЧИЖИК<sup>1)</sup>, В. Л. ФИЛИПЕНЯ<sup>1)</sup>, Н. Б. ПАВЛОВСКИЙ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь

---

#### Образец цитирования:

Рупасова ЖА, Задаля ВС, Чижик ОВ, Филипена ВЛ, Павловский НБ. Влияние способа вегетативного размножения на антиоксидантный комплекс плодов сортов *Vaccinium corymbosum* L. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2021;2:74–83.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-74-83>

#### For citation:

Rupasova ZhA, Zadalya VS, Chizhik OV, Filipenia VL, Pavlovsky NB. Vegetative propagation method influence on the antioxidant complex of *Vaccinium corymbosum* L. cultivars. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2021;2:74–83. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-74-83>

---

#### Авторы:

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

**Виктория Сергеевна Задаля** – научный сотрудник лаборатории химии растений.

**Ольга Владимировна Чижик** – кандидат биологических наук, доцент; заведующий лабораторией клеточной биотехнологии.

**Вероника Леонидовна Филипена** – заведующий производственным отделом «Биотехнологический комплекс».

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

#### Authors:

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

[J.Rupasova@cbg.org.by](mailto:J.Rupasova@cbg.org.by)

**Victoria S. Zadalya**, researcher at the laboratory of chemistry of plants.

[zada.93@mail.ru](mailto:zada.93@mail.ru)

**Olga V. Chizhik**, PhD (biology), docent; head of the laboratory of cell biotechnology.

[chizhikolga17@gmail.com](mailto:chizhikolga17@gmail.com)

**Veronika L. Filipenia**, head of production at the department «Biotechnological complex».

[veronica\\_filipenia@yahoo.com](mailto:veronica_filipenia@yahoo.com)

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

[pavlovskiy@tut.by](mailto:pavlovskiy@tut.by)

Приведены результаты сравнительного исследования в опытной культуре в центральной агроклиматической зоне Беларуси влияния способа вегетативного размножения растений (черенкованием и микроклональным) на антиоксидантную и ферментативную (каталаза, пероксидаза и полифенолоксидаза) активности плодов раннеспелого (Weymouth) и позднеспелых (Elizabeth и Atlantik) сортов *V. corymbosum* L. Показано, что на фоне существенных генотипических различий зависимости исследуемых характеристик антиоксидантного комплекса от способа размножения, плоды меристемных растений характеризовались на 5–21 % более высокой активностью каталазы (особенно пероксидазы) по сравнению с традиционными аналогами, но при этом на 13 % более низкой активностью полифенолоксидазы у сортов *Weymouth* и *Atlantik* и на 8 % более высокой у сорта *Elizabeth*. На основе анализа корреляционных связей между обозначенными компонентами антиоксидантного комплекса плодов растений, полученных разными способами, с одной стороны, и содержанием в них аскорбиновой и гидроксикоричных кислот, пектиновых веществ, собственно антоцианов, лейкоантоцианов, катехинов и флавонолов, с другой, установлены различия между меристемными и традиционными растениями по источникам антиоксидантной и ферментативной активности.

**Ключевые слова:** голубика; сорта; черенкование и микроклональные способы вегетативного размножения; плоды; антиоксидантная активность; ферменты; каталаза; пероксидаза; полифенолоксидаза.

## VEGETATIVE PROPAGATION METHOD INFLUENCE ON THE ANTIOXIDANT COMPLEX OF *VACCINIUM CORYMBOSUM* L. CULTIVARS

Zh. A. RUPASOVA<sup>a</sup>, V. S. ZADALYA<sup>a</sup>, O. V. CHIZHIK<sup>a</sup>, V. L. FILIPENIA<sup>a</sup>, N. B. PAVLOVSKY<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Central Botanical Garden, National Academy of Sciences of Belarus,  
2v Surganova Street, Minsk 220012, Belarus  
Corresponding author: Zh. A. Rupasova (J.Rupasova@cbg.org.by)

There are presented the results of a comparative study in an experimental culture in the central agro-climatic zone of Belarus, the influence of the method vegetative propagation of plants (cuttings and microclonal) on antioxidant and enzymatic (catalase, peroxidase and polyphenol oxidase) activity of fruits of early ripening (Weymouth) and late ripening (Elizabeth and Atlantik) varieties *V. corymbosum* L. It was shown that against the background of significant genotypic differences dependence of the studied characteristics of the antioxidant complex on the method reproduction, the fruits of meristemic plants were characterized by 5–21 % higher activity of catalase and especially peroxidase in comparison with traditional analogues, but at the same time 13 % lower activity of polyphenol oxidase in varieties *Weymouth* and *Atlantik* and 8 % higher in *Elizabeth*. Based on analysis correlations between the indicated components of the antioxidant a complex of plant fruits obtained in different ways, on the one hand, and the content in them of ascorbic and hydroxycinnamic acids, pectin substances, actually anthocyanins, leukoanthocyanins, catechins and flavonols, on the other hand, the differences between meristem and traditional plants have been established according to sources of antioxidant and enzymatic activity.

**Keywords:** blueberry; cultivars; cutting and microclonal methods of vegetative propagation; berries; antioxidant activity; enzymes; catalase; peroxidase; polyphenol oxidase.

### Введение

В связи с прогрессирующим увеличением в Беларуси площадей промышленных плантаций голубики высокорослой (*Vaccinium corymbosum* L.), существенно возросли потребности специализированных хозяйств в посадочном материале данной культуры. Основным способом его получения является вегетативное размножение растений посредством укоренения стеблевых черенков, наряду с которым все большее распространение получает микроклональный способ размножения (*in vitro*), обладающий рядом преимуществ по сравнению с традиционным. В частности, он значительно ускоряет процесс получения оздоровленного посадочного материала и позволяет существенно увеличить коэффициент размножения одного маточного растения. Вместе с тем научная информация о влиянии традиционного и культурального способов вегетативного размножения на дальнейший рост, развитие, плодоношение и биохимический состав плодов интродуцированных сортов голубики в нашей стране весьма ограничена и носит фрагментарный характер [1].

Основная ценность ягодной продукции голубики высокорослой состоит в чрезвычайно высоком содержании в ней биофлавоноидов, обладающих Р-витаминным действием и являющихся общепризнанными антиоксидантами, прерывающими нарастающие процессы окисления с образованием малоактивных радикалов, которые легко выводятся из организма. Нашими исследованиями антиоксидантной активности (АОА) этанольных экстрактов из плодов ряда таксонов голубики в Припятском Полесье [2] были

установлены весьма высокие значения данного показателя, обусловленные значительным содержанием в них биофлавоноидов, в первую очередь антоциановых пигментов [3]. При этом на основе анализа парной корреляции между уровнем АОА и содержанием в плодах голубики органических соединений разной химической природы была доказана существенная роль в ее обеспечении, наряду с полифенолами, других биологически активных соединений. Вместе с тем на примере ряда модельных сортов голубики высокорослой разных сроков созревания было установлено заметное влияние способа вегетативного размножения растений на биохимический состав ягодной продукции, в том числе на содержание в ней биофлавоноидов и других потенциальных источников антиоксидантной активности [4]. В этой связи представлялось целесообразным исследовать влияние данного фактора на уровень антиоксидантной (АОА) и ферментативной активности плодов голубики, обеспечиваемой работой основных ферментов окислительно-восстановительного цикла – каталазы (КАТ), пероксидазы (ПО) и полифенолоксидазы (ПФО), а также на структуру корреляционных связей компонентов антиоксидантного комплекса с содержанием в них ряда биологически активных соединений.

### Материалы и методы исследований

С целью установления степени возможного влияния на обозначенные характеристики антиоксидантного комплекса плодов голубики способа вегетативного размножения растений, исследования проводились на научно-экспериментальной базе Центрального ботанического сада НАН Беларуси (Ганцевичский р-н Брестская обл.), расположенной в центральной агроклиматической зоне Беларуси в районе распространения легких песчаных дерново-подзолистых почв и осушенных верховых торфяников. В условиях сезона 2019 г. на фоне преобладания жаркой и засушливой погоды со значительными колебаниями температурных показателей и неравномерным выпадением атмосферных осадков было проведено сравнительное изучение в опытной культуре антиоксидантной и ферментативной активности плодов трех интродуцированных сортов *V. corymbosum* разных сроков созревания – раннеспелого *Weymouthi* двух позднеспелых *Elizabeth* и *Atlantic*, полученных традиционным (стеблевым черенкованием) и микроклональным способами вегетативного размножения.

Исследования были выполнены в рамках полевого эксперимента с пятилетними растениями голубики высокорослой после подтверждения генетической идентичности меристемных и традиционных растений обозначенных выше сортов на основе ПЦР-анализа. Определение антиоксидантной и ферментативной активности плодов осуществлялось в лаборатории химии растений Центрального ботанического сада НАН Беларуси.

В этанольных экстрактах из усредненных проб свежих плодов голубики определяли антиоксидантную активность с использованием 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (ДФПГ) [5; 6], активность пероксидазы – по методу А. Н. Бояркина [7]; полифенолоксидазы – с пирокатехином по методу [8], каталазы – по методу А. Н. Баха и А. И. Опарина [9].

Все аналитические определения выполнены в 3-кратной биологической повторности. Данные статистически обработаны с использованием программы Excel.

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования выявили существенную зависимость уровня антиоксидантной и ферментативной активности ягодной продукции голубики от способа размножения и генотипа растений. Как следует из табл. 1, общий уровень антиоксидантной активности этанольных экстрактов из плодов модельных сортов *V. corymbosum* L., выраженный в мкмоль экв тролокса /г сухого вещества, варьировался при 10- и 30-минутной экспозициях у традиционных и клонированных растений в весьма широких и различающихся между собой диапазонах значений, составлявших в первом случае 50,6–85,6 и 55,5–70,9, во втором – 55,9–90,9 и 64,7–73,9.

Представляется вполне объяснимым соответствие уровня АОА при 30-минутной экспозиции области более высоких, нежели при 10-минутной, значений, поскольку соединения, обладающие активностью, в процессе взаимодействия с катион-радикалами при меньшей экспозиции обеспечивали хотя и основную, но все же неполный вклад в АОА, тогда как на последующей замедленной стадии, скорее всего, протекала реакция с катион-радикалами продуктов окисления биологически активных соединений, образовавшихся на начальной стадии процесса. Подобная закономерность была получена ранее в аналогичных исследованиях А. М. Макаревич и В. Н. Решетниковым [10].

Значительная ширина приведенных диапазонов варьирования уровня АОА косвенно свидетельствовала о его существенной зависимости от генотипа опытных растений, причем заметное их сужение у меристемных растений указывало на ослабление данной зависимости, по сравнению с растениями, выращенными *in vivo*, у которых наиболее высоким уровнем антиоксидантной активности плодов при обеих экспозициях характеризовался раннеспелый сорт *Weymouth*, тогда как наименьшим – позднеспелый сорт

*Elizabeth*. Клонированные же растения обоих позднеспелых сортов голубики, независимо от продолжительности реакции, характеризовались сходными, причем более высокими, чем у раннеспелого сорта, значениями данного показателя.

Таблица 1

Уровень антиоксидантной активности этанольных экстрактов из плодов клонированных и традиционных растений сортов *V. corymbosum* L. в мкмоль экв тролокса / г сухого вещества

Table 1

Antioxidant activity level of ethanol extracts from fruits of cloned and traditional plants of *V. corymbosum* L. cultivars in micromole equiv of trolox / g dry matter

Сорт	Способ размножения	АОА (ДФПГ) через 10 мин.		АОА (ДФПГ) через 30 мин.	
		$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>
<i>Weymouth</i>	<i>in vivo</i>	85,6±0,7		90,9±1,1	
	<i>in vitro</i>	55,5±1,6	-17,2*	64,7±1,0	-17,8*
<i>Elizabeth</i>	<i>in vivo</i>	50,6±0,8		55,9±1,4	
	<i>in vitro</i>	68,5±1,4	10,9*	72,2±0,5	11,1*
<i>Atlantik</i>	<i>in vivo</i>	66,3±3,9		75,2±3,8	
	<i>in vitro</i>	70,9±7,0	0,6	73,9±8,1	-0,1

Примечание. Звездочка (\*) – статистически значимые по t-критерию Стьюдента различия при  $p < 0,05$ .

Результаты определения уровня активности основных окислительно-восстановительных ферментов в сухом веществе плодов опытных растений, приведенные в табл. 2, показали, что значения исследуемого показателя у традиционных и клонированных растений варьировались в соответствующих диапазонах значений: для каталазы (КАТ) – 5,72–7,68 и 6,03–8,01 мкмоль  $H_2O_2$ /(г·мин.), пероксидазы (ПО) – 3,14–4,59 и 3,79–4,86 ед. опт. плотн. / (г·мин), полифенолоксидазы (ПФО) – 466,7–525,6 и 404,4–564,8 ед. опт. плотн. / (г·мин). Приведенные диапазоны варьирования обозначенных признаков указывали на более высокий уровень ферментативной активности в плодах меристемных растений относительно традиционных. При этом, независимо от способа размножения растений, позднеспелые сорта голубики характеризовались довольно близкими, но при этом более высокими, чем у раннеспелого сорта, значениями активности КАТ и ПФО, но более низкими показателями активности ПО. Представление о степени влияния генотипа растений и способа их вегетативного размножения на антиоксидантную и ферментативную активность плодов опытных сортов голубики можно составить по данным табл. 3. Так, независимо от продолжительности реакции, уровень АОА этанольных экстрактов из плодов клонированных растений раннеспелого сорта уступал таковому традиционных на 29–35 %, тогда как у позднеспелого сорта *Elizabeth* превосходил его в аналогичном диапазоне значений при отсутствии различий по данному признаку у сорта *Atlantik*. При этом меристемные растения всех модельных сортов голубики характеризовались достоверно более высокой активностью в плодах КАТ и особенно ПО по сравнению с обычными растениями – на 5 и 6 % у сорта *Weymouth*, на 8 и 21 % у сорта *Elizabeth* и на 4 и 16 % у сорта *Atlantik*, но при этом на 13 % более низкой активностью ПФО у сортов *Weymouth* и *Atlantik* и на 8 % более высокой у сорта *Elizabeth*.

Общеизвестно, что в биологических системах в качестве антиоксидантов, наряду с биофлавоноидами, обладающими данными свойствами [11], могут выступать соединения иной химической природы, способные ингибировать процессы свободнорадикального окисления, в том числе каротиноиды, белки, органические кислоты и даже пектиновые вещества [12]. В связи с этим особый научный интерес представляло выявление в плодах голубики основных источников антиоксидантной и ферментативной активности в зависимости от генотипа и способа вегетативного размножения растений. С этой целью в плодах опытных объектов были определены значения коэффициентов парной корреляции между данными признаками и содержанием органических соединений, предположительно являющихся источниками данной активности. Для выявления компонентов биохимического состава плодов голубики, обеспечивающих наиболее высокий уровень последней, при анализе корреляционных связей мы ориентировались исключительно на наиболее тесные из них, определяемые абсолютными значениями коэффициента корреляции  $r > 0,70$  и представленные в табл. 4.

Как оказалось, из 168 статистических связей между содержанием в плодах трех опытных сортов голубики 7 видов органических соединений, являющихся предполагаемыми источниками исследуемой активности, с одной стороны, и уровнями АОА и трех окислительно-восстановительных ферментов – каталазы, пероксидазы и полифенолоксидазы, с другой, на долю наиболее сильных положительных связей

приходилось 37, или 22 % их общего количества, тогда как на долю аналогичных отрицательных связей – 50, или 30 %. При этом в обоих случаях наибольшим количеством наиболее тесных связей отличалось содержание гидроксикоричных кислот. Остальная часть корреляционных связей характеризовалась средней, умеренной, слабой и очень слабой силой. Установлено, что в большинстве случаев наиболее тесные связи между анализируемыми признаками носили индивидуальный характер для каждого таксона голубики, что свидетельствовало об их выраженной сортоспецифичности, и лишь для незначительной их части отмечено совпадение у опытных объектов. Так, у растений *in vivo* обоих позднеспелых сортов выявлена весьма тесная положительная связь между уровнем АОА, с одной стороны, и содержанием аскорбиновой и гидроксикоричных кислот, с другой. С остальными же предполагаемыми источниками антиоксидантной активности ее тесного прямого взаимодействия у данных сортов голубики не установлено, причем для основных компонентов Р-витаминного комплекса, за исключением флавонолов у сорта *Elizabeth* и лейкоантоцианов у сорта *Atlantik*, была показана довольно сильная обратная связь с уровнем АОА. В отличие от позднеспелых сортов, у традиционных растений раннеспелого сорта *Weymouth* обнаружена тесная положительная корреляция лишь с содержанием в плодах собственно антоцианов на фоне сильной обратной взаимосвязи с содержанием гидроксикоричных кислот и лейкоантоцианов при отсутствии заметной связи с другими органическими соединениями. Не составляет труда убедиться в наличии у традиционных растений голубики сортоспецифичности в обеспечении высокого уровня антиоксидантной активности за счет ее разных источников.

Таблица 2

**Активность окислительно-восстановительных ферментов  
 в плодах клонированных и традиционных растений сортов *V. corymbosum* L. (в сухом веществе)**

Table 2

**Redox enzyme's activity in *V. corymbosum* L. cultivar's fruits of cloned and traditional plants (in dry matter)**

Сорт	Способ размножения	Активность КАТ, мкмоль H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /(г·мин)		Активность ПО, ед. опт. плотн. / (г·мин)		Активность ПФО, ед. опт. плотн. / (г·мин)	
		$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_x$	<i>t</i>
<i>Weymouth</i>	<i>in vivo</i>	5,72±0,01		4,59±0,03		466,7±2,5	
	<i>in vitro</i>	6,03±0,07	4,5*	4,86±0,03	6,3*	404,4±3,0	-16,2*
<i>Elizabeth</i>	<i>in vivo</i>	6,79±0,15		3,14±0,08		525,6±0,5	
	<i>in vitro</i>	7,31±0,07	3,6*	3,79±0,05	5,3*	564,8±3,9	9,9*
<i>Atlantik</i>	<i>in vivo</i>	7,68±0,05		3,35±0,02		500,6±2,1	
	<i>in vitro</i>	8,01±0,08	3,4*	3,90±0,10	5,6*	436,9±1,4	-5,3*

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

Таблица 3

**Относительные различия уровня антиоксидантной и ферментативной активности плодов  
 сортов *V. corymbosum* L. при разных способах вегетативного размножения растений (*in vitro* / *in vivo*), %**

Table 3

**Relative differences in the level of antioxidant and enzymatic activity of *V. corymbosum* L. cultivar's fruits (*in vitro* / *in vivo*), %**

Показатель	Сорт			
	<i>Weymouth</i>	<i>Bluecrop</i>	<i>Elizabeth</i>	<i>Atlantik</i>
АОА (ДФПГ) через 10 мин.	-35,2	Не опр.	+35,4	–
АОА (ДФПГ) через 30 мин.	-28,8	–«–	+29,2	–
Активность КАТ	+5,4	–«–	+7,7	+4,3
Активность ПО	+5,9	–«–	+20,7	+16,4
Активность ПФО	-13,3	–«–	+7,5	-12,7

Примечание. Прочерк (–) означает отсутствие статистически значимых по t-критерию Стьюдента различий при  $p < 0,05$ .

При микроклональном способе размножения растений структура исследуемых корреляционных связей выглядела иначе (табл. 4). В данном случае тесная прямая связь уровня АОА с содержанием гидрокси-коричных кислот, выявленная у традиционных растений обоих позднеспелых сортов, сменилась столь же сильной отрицательной связью, свойственной, впрочем, раннеспелому сорту при обоих способах размножения. Наряду с этим у клонированных растений сортов *Weymouth* и *Elizabeth* наблюдалось усиление, по сравнению с растениями *in vivo*, обратной связи между уровнем АОА и содержанием аскорбиновой кислоты на фоне проявления в обоих случаях сильной положительной связи между данными показателями у сорта *Atlantik*. Это сопровождалось существенным усилением роли пектиновых веществ в обеспечении антиоксидантных свойств плодов у первой пары сортов при нарастании их отрицательного влияния на эти свойства у сорта *Atlantik*. Вместе с тем для сортов *Weymouth* и *Elizabeth* было показано проявление, а в ряде случаев и усиление уже существующей отрицательной корреляционной зависимости между уровнем АОА и содержанием в плодах собственно антоцианов и флавонолов и незначительное усиление позитивного влияния на него катехинов и особенно близких им по химической природе лейкоантоцианов [13]. При этом изменение структуры корреляционных связей между уровнем АОА и основными компонентами Р-витаминного комплекса у клонированных растений сорта *Atlantik* носило противоположный установленному у двух предыдущих сортов характер.

Таблица 4

Коэффициенты парной корреляции ( $R_{xy}$ ) между содержанием органических соединений в плодах клонированных и традиционных растений сортов *V. corymbosum* L. и уровнем их антиоксидантной и ферментативной активности

Table 4

Pair correlation coefficients ( $R_{xy}$ ) between the organic compounds content and an antioxidant and enzymatic activity level in the fruits of cloned and traditional plants of *V. corymbosum* L. cultivars

Сорт	Способ размножения	Аскорбиновая кислота	Пектины	Гидрокси-коричные кислоты	Антоцианы	Лейко-антоцианы	Катехины	Флавонолы
<b>Антиоксидантная активность</b>								
<i>Weymouth</i>	<i>in vivo</i>	-0,25	0,04	<b>-0,92</b>	0,66	<b>-0,97</b>	0,32	-0,01
	<i>in vitro</i>	<b>-0,79</b>	0,57	<b>-0,83</b>	0,07	0,07	0,35	<b>-0,92</b>
<i>Elizabeth</i>	<i>in vivo</i>	0,57	0,08	<b>0,99</b>	-0,59	<b>-0,99</b>	<b>-0,71</b>	0,59
	<i>in vitro</i>	-0,62	<b>0,99</b>	<b>-0,99</b>	<b>-0,70</b>	<b>0,95</b>	0,38	<b>-0,99</b>
<i>Atlantik</i>	<i>in vivo</i>	<b>0,87</b>	-0,03	<b>0,93</b>	<b>-0,80</b>	<b>0,87</b>	-0,66	-0,61
	<i>in vitro</i>	<b>0,94</b>	-0,59	<b>-0,99</b>	<b>0,73</b>	0,53	<b>-0,96</b>	0,59
<b>Активность каталазы</b>								
<i>Weymouth</i>	<i>in vivo</i>	0,55	<b>-0,72</b>	-0,33	<b>1,00</b>	-0,46	-0,50	<b>0,74</b>
	<i>in vitro</i>	<b>-0,99</b>	<b>0,93</b>	<b>-1,00</b>	-0,50	-0,50	-0,24	<b>-0,98</b>
<i>Elizabeth</i>	<i>in vivo</i>	-0,50	<b>-0,87</b>	0,40	<b>-0,98</b>	-0,38	0,33	<b>0,98</b>
	<i>in vitro</i>	-0,48	<b>0,99</b>	<b>-0,99</b>	-0,58	<b>0,88</b>	0,52	<b>-0,99</b>
<i>Atlantik</i>	<i>in vivo</i>	<b>-0,98</b>	-0,28	<b>-0,77</b>	0,58	<b>-0,98</b>	<b>0,86</b>	0,33
	<i>in vitro</i>	<b>0,80</b>	-0,33	<b>-0,95</b>	0,50	<b>0,76</b>	<b>-1,00</b>	0,32
<b>Активность пероксидазы</b>								
<i>Weymouth</i>	<i>in vivo</i>	-0,50	0,67	0,39	<b>-0,99</b>	0,51	0,44	<b>-0,70</b>
	<i>in vitro</i>	<b>0,99</b>	<b>-0,93</b>	<b>1,00</b>	0,50	0,50	0,24	<b>0,98</b>
<i>Elizabeth</i>	<i>in vivo</i>	0,52	<b>0,88</b>	-0,38	<b>0,98</b>	0,36	-0,35	<b>-0,98</b>
	<i>in vitro</i>	0,50	<b>-1,00</b>	<b>1,00</b>	0,60	<b>-0,89</b>	-0,50	<b>0,99</b>
<i>Atlantik</i>	<i>in vivo</i>	<b>-0,98</b>	-0,28	<b>-0,77</b>	0,57	<b>-0,98</b>	<b>0,87</b>	0,33
	<i>in vitro</i>	<b>-0,79</b>	0,31	<b>0,94</b>	<b>-0,77</b>	<b>-0,77</b>	<b>0,99</b>	-0,30
<b>Активность полифенолоксидазы</b>								
<i>Weymouth</i>	<i>in vivo</i>	<b>0,98</b>	<b>-0,91</b>	<b>0,76</b>	0,37	0,66	<b>-0,99</b>	<b>0,89</b>
	<i>in vitro</i>	<b>-0,99</b>	<b>0,93</b>	<b>-1,00</b>	-0,50	-0,49	-0,23	<b>-0,98</b>
<i>Elizabeth</i>	<i>in vivo</i>	-0,52	<b>-0,88</b>	0,38	<b>-0,98</b>	-0,35	0,35	<b>0,98</b>
	<i>in vitro</i>	-0,26	<b>-0,70</b>	<b>0,70</b>	-0,15	-0,31	<b>-0,97</b>	0,62
<i>Atlantik</i>	<i>in vivo</i>	<b>0,99</b>	0,43	0,65	-0,43	<b>0,99</b>	<b>-0,94</b>	-0,17
	<i>in vitro</i>	<b>-0,79</b>	0,31	<b>0,94</b>	-0,49	<b>-0,77</b>	<b>0,99</b>	-0,31

Как видим, на фоне выраженной сортоспецифичности структуры корреляционных связей при обоих способах размножения растений у позднеспелых сортов голубики, выращенных *in vivo*, основными источниками антиоксидантной активности являлись аскорбиновая и гидроксикоричные кислоты, у раннеспелого сорта – собственно антоцианы. У клонированных же растений сортов *Weymouth* и *Elizabeth* выявлено отчетливое сходство в усилении относительно традиционных растений роли пектиновых веществ, катехинов и лейкоантоцианов в обеспечении антиоксидантных свойств плодов при ослаблении таковой витамина С и гидроксикоричных кислот, тогда как для сорта *Atlantik* было показано повышение значения в этом плане собственно антоцианов и флавонолов при сохранении приоритетной роли аскорбиновой кислоты и отсутствии влияния на уровень АОА гидроксикоричных кислот.

Исследование структуры корреляционных связей между активностью ферментов окислительно-восстановительного цикла и обозначенными выше компонентами биохимического состава плодов традиционных растений голубики показало наличие у всех модельных сортов положительной связи между активностью каталазы и параметрами накопления флавонолов при наиболее сильном ее проявлении у сортов *Weymouth* и *Elizabeth*. Наряду с этим выявлена прямая связь уровня КАТ с содержанием собственно антоцианов у сортов *Atlantik* и *Weymouth*, катехинов – у позднеспелых сортов и в единичных случаях – с содержанием аскорбиновой кислоты у раннеспелого сорта и гидроксикоричных кислот у сорта *Elizabeth*, что при явной сортоспецифичности силы этой связи позволяло считать данные соединения основными источниками каталазной активности у соответствующих опытных объектов (см. табл. 4). Для остальных органических соединений была установлена отрицательная корреляция с уровнем активности КАТ, наиболее выраженная у позднеспелых сортов.

У меристемных растений голубики выявлены заметные изменения структуры связей между активностью каталазы и содержанием рассматриваемых соединений по сравнению с их традиционными аналогами, в ряде случаев имевшие сходство с показанными выше для уровня АОА. Так, у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* наблюдалось проявление очень сильной прямой связи между активностью данного фермента и содержанием в плодах пектиновых веществ, у позднеспелых сортов – лейкоантоцианов, а также единично – аскорбиновой кислоты (сорт *Atlantik*) и катехинов (сорт *Elizabeth*). При этом, как и в исследованиях антиоксидантной активности, у клонированных растений всех модельных сортов, в отличие от их традиционных аналогов, установлена отрицательная корреляция между активностью каталазы и содержанием гидроксикоричных кислот, у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* – флавонолов, у сорта *Weymouth* – аскорбиновой кислоты и собственно антоцианов, а у сорта *Atlantik* – с содержанием катехинов, что подтверждалось наличием в основном сильных обратных связей с данными показателями.

Это позволяет заключить, что на фоне выраженной сортоспецифичности корреляционных связей между активностью каталазы и содержанием ряда органических соединений в плодах голубики при размножении *in vivo* основными источниками активности данного фермента следовало признать флавонолы, собственно антоцианы и катехины. В изменении структуры связей при микроклональном способе размножения выявлено заметное сходство с установленным для уровня АОА. При этом в обеспечении высокого уровня каталазной активности у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* приоритетное значение обретали пектиновые вещества, у позднеспелых сортов – лейкоантоцианы при преимущественном отрицательном влиянии на него гидроксикоричных кислот и флавонолов, а в единичных случаях также аскорбиновой кислоты и собственно антоцианов (сорт *Weymouth*) и катехинов (сорт *Atlantik*).

На основании исследования структуры корреляционных связей между активностью пероксидазы и содержанием биологически активных соединений в плодах традиционных растений голубики установлено наличие у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* ее средней и сильной положительной связи с содержанием пектиновых веществ и более слабой с таковым лейкоантоцианов (см. табл. 4). Вместе с тем у обоих позднеспелых сортов выявлена средняя и сильная прямая связь между уровнем активности ПО и содержанием собственно антоцианов, причем у сортов *Weymouth* и *Atlantik* подобная связь прослеживалась и с содержанием катехинов при довольно слабом ее проявлении у второго сорта в отношении флавонолов. В остальных же случаях взаимозависимость у исследуемых показателей была отрицательной.

Изменения в структуре корреляционных связей данного фермента при культуральном способе размножения растений в основном имели противоположный с установленным для уровней антиоксидантной и каталазной активности характер. Так, независимо от генотипа опытных растений, здесь наблюдалось чрезвычайно выраженное не ослабление, но проявление тесной положительной связи между активностью ПО и содержанием в плодах гидроксикоричных кислот, а у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* также с содержанием флавонолов при одновременном исчезновении у них характерной для традиционных растений тесной прямой связи с содержанием пектиновых веществ. Наряду с этим, в отличие от традиционных у меристемных растений раннеспелого сорта была показана не отрицательная, как у антиоксидантной и каталазной активности, а средняя и сильная положительная корреляция с содержанием аскорбиновой кислоты и собственно антоцианов на фоне исчезновения прямой связи с последними только у сорта *Atlantik*. При этом

изменения остальных корреляционных связей у меристемных растений относительно их традиционных аналогов были маловыразительными.

Как видим, при отчетливой сортоспецифичности корреляционных связей между активностью пероксидазы и содержанием органических соединений в плодах традиционных растений голубики, основными носителями активности данного фермента являлись пектиновые вещества, собственно антоцианы и лейкоантоцианы. У меристемных растений выявлены преимущественно противоположные по знаку установленным для уровней АОА и активности каталазы изменения в структуре корреляционных связей данного фермента относительно традиционных аналогов. Показано, что приоритетное значение в обеспечении высокого уровня активности ПО принадлежало гидроксикоричным кислотам и флавонолам, а у сорта *Weymouth* аскорбиновой кислоте и собственно антоцианам при отрицательном влиянии на данный показатель пектиновых веществ.

Анализ структуры корреляционных связей между уровнем активности полифенолоксидазы и содержанием органических соединений в плодах традиционных растений модельных сортов голубики, как и во всех предыдущих случаях, выявил в ней общие закономерности и существенные генотипические различия. Поскольку данная оксидаза является основным ферментом фенольного метаболизма, то для нее следовало ожидать более выраженного, чем у каталазы и пероксидазы, проявления взаимодействия с веществами фенольной природы. Данное предположение подтверждают данные табл. 4, показавшие существование у всех опытных объектов тесной прямой связи активности ПФО с содержанием гидроксикоричных кислот, относящихся к соединениям ряда  $C_6 - C_3$  [14]. У сорта *Weymouth* выявлена умеренная и средняя положительная связь активности фермента с содержанием антоцианов и лейкоантоцианов при наибольшей степени ее проявления с содержанием флавонолов и аскорбиновой кислоты, являющейся общепризнанным стабилизатором фенольных соединений [15]. При этом для содержания катехинов и пектиновых веществ была установлена очень сильная обратная корреляция с активностью ПФО.

В отличие от раннеспелого, у позднеспелых сортов, особенно *Elizabeth*, положительные связи полифенолоксидазной активности с содержанием фенольных соединений проявились заметно слабее, чем у раннеспелого сорта. В частности, у сорта *Elizabeth* при наличии ее весьма умеренной прямой связи с содержанием гидроксикоричных кислот и катехинов тоже обнаружена прямая, но при этом чрезвычайно тесная связь лишь с содержанием флавонолов, тогда как с соединениями антоцианового комплекса, аскорбатом и пектиновыми веществами данное взаимодействие характеризовалось отрицательной направленностью при разной степени выразительности.

В отличие от сорта *Elizabeth*, у традиционных растений сорта *Atlantik* прямые корреляционные связи активности ПФО с содержанием органических соединений проявились намного сильнее. Так, при наличии довольно тесной положительной корреляции с содержанием гидроксикоричных кислот была показана также чрезвычайно сильная прямая взаимосвязь с содержанием в плодах лейкоантоцианов, имевшая, кстати, общий характер с установленной для сорта *Weymouth*. Вместе с тем для остальных групп биофлавоноидов прямых связей с активностью данного фермента выявлено не было. Более того, для содержания катехинов была показана чрезвычайно сильная отрицательная корреляция с активностью ПФО, но при этом была отмечена столь же сильная положительная связь с ней для содержания аскорбиновой кислоты при умеренной связи с содержанием пектиновых веществ.

Изменения в структуре корреляционных связей активности ПФО при культуральном способе размножения растений относительно их традиционных аналогов в значительной степени совпадали с установленными для уровней антиоксидантной и пероксидазной активностей. В частности, было обнаружено более выраженное проявление отрицательной взаимосвязи активности ПФО с содержанием аскорбиновой кислоты, собственно антоцианов, лейкоантоцианов и флавонолов на фоне преимущественного усиления прямых связей с содержанием гидроксикоричных кислот и в единичных случаях с содержанием пектиновых веществ (сорт *Weymouth*) и катехинов (сорт *Atlantik*).

Нетрудно убедиться, что несмотря на показанные генотипические различия в структуре корреляционных связей между активностью ПФО и содержанием органических соединений в плодах традиционных растений голубики, основными ее источниками следовало признать аскорбиновую и гидроксикоричные кислоты, лейкоантоцианы и флавонолы. У клонированных растений в характере изменений структуры корреляционных связей активности ПФО относительно традиционных аналогов выявлено заметное сходство с установленным для уровней АОА и активности ПО. Показано, что приоритетную роль в обеспечении высокого уровня активности данного фермента здесь играли гидроксикоричные кислоты, а в единичных случаях также пектиновые вещества (сорт *Weymouth*) и катехины (сорт *Atlantik*) при преимущественном отрицательном влиянии на него аскорбиновой кислоты, собственно антоцианов, лейкоантоцианов и флавонолов.

## Заключение

В результате сравнительного исследования в опытной культуре в центральной агроклиматической зоне Беларуси влияния способа вегетативного размножения растений (черенкованием и микроклонального) на антиоксидантный комплекс плодов раннеспелого (*Weymouth*) и позднеспелых (*Elizabeth* и *Atlantik*) сортов *V. corymbosum* L. установлена существенная зависимость от него антиоксидантной и ферментативной активности (каталаза, пероксидаза и полифенолоксидаза), а также структуры их корреляционных связей с содержанием биологически активных соединений. На фоне существенных генотипических различий степени данной зависимости меристемные растения характеризовались на 5–21 % более высокой активностью каталазы и особенно пероксидазы по сравнению с традиционными аналогами, но при этом на 13 % более низкой активностью полифенолоксидазы у сортов *Weymouth* и *Atlantik* и на 8 % более высокой у сорта *Elizabeth*.

При размножении растений *in vivo* для позднеспелых сортов основными источниками антиоксидантной активности являлись аскорбиновая и гидроксикоричные кислоты, у раннеспелого – собственно антоцианы, тогда как в обеспечении антиоксидантных свойств плодов клонированных растений сортов *Weymouth* и *Elizabeth* выявлено усиление относительно традиционных аналогов роли пектиновых веществ, катехинов и лейкоантоцианов при ослаблении таковой витамина С и гидроксикоричных кислот, а для сорта *Atlantik* – повышение значения собственно антоцианов и флавонолов при сохранении приоритетной роли витамина С.

У традиционных растений основными источниками активности каталазы являлись флавонолы, собственно антоцианы и катехины. Показано, что в обеспечении высокого уровня активности данного фермента у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* приоритетное значение принадлежало пектиновым веществам, у позднеспелых сортов – лейкоантоцианам на фоне доминирования отрицательного влияния на него гидроксикоричных кислот и флавонолов. При выраженном сходстве у клонированных растений в характере изменения структуры корреляционных связей активности каталазы с установленным для уровня АОА отмечено, что в обеспечении ее высокого уровня у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* приоритетное значение принадлежало пектиновым веществам, у позднеспелых сортов – лейкоантоцианам на фоне доминирования отрицательного влияния на него гидроксикоричных кислот и флавонолов, а в единичных случаях аскорбиновой кислоты и собственно антоцианов (сорт *Weymouth*), а также катехинов (сорт *Atlantik*).

В плодах традиционных растений голубики основными носителями активности пероксидазы являлись пектиновые вещества, собственно антоцианы и лейкоантоцианы, тогда как у их клонированных аналогов выявлены преимущественно противоположные по знаку установленным для уровней АОА и активности каталазы изменения в структуре корреляционных связей. Показано, что приоритетное значение в обеспечении высокого уровня активности данного фермента принадлежало гидроксикоричным кислотам и флавонолам, а у раннеспелого сорта также аскорбиновой кислоте и собственно антоцианам при отрицательном влиянии на него пектиновых веществ.

При размножении растений черенкованием основными носителями полифенолоксидазной активности являлись аскорбиновая и гидроксикоричные кислоты, лейкоантоцианы и флавонолы. У клонированных растений выявлено сходство изменений относительно традиционных аналогов в структуре корреляционных связей данного фермента с установленными для антиоксидантной и пероксидазной активностей. Установлено, что приоритетную роль в обеспечении высокого уровня активности полифенолоксидазы играли гидроксикоричные кислоты, а в единичных случаях также пектиновые вещества (сорт *Weymouth*) и катехины (сорт *Atlantik*) при преимущественном отрицательном влиянии на него аскорбиновой кислоты, собственно антоцианов, лейкоантоцианов и флавонолов.

## Библиографические ссылки

1. Рупасова ЖА, Кутас ЕН, Игнатенко ВА и др. Влияние способов размножения на химический состав листьев растений семейства Брусничные. Сообщение II. Голубика высокая. *Известия Академии аграрных наук Беларуси*. 1998;1:44–49.
2. Рупасова ЖА и др. *Возделывание голубики на торфяных выработках Припятского Полесья (физиолого-биохимические аспекты развития)*. Минск: Беларуская навука; 2016. 242 с.
3. Ehlenfeldt МК, Prior RL. Oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and phenolic and anthocyanin concentrations in fruit and leaf tissues of highbush blueberry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001;49:2222–2227.
4. Рупасова ЖА, Василевская ТИ, Криницкая НБ и др. Влияние способа вегетативного размножения сортов *Vaccinium corymbosum* L. на биохимический состав плодов. *Известия НАН Беларуси. Серия биологических наук*. 2020;65(2):220–228.
5. Мальцева ЕМ и др. Антиоксидантная и антирадикальная активность *in vitro* экстрактов травы *Sanguisorba officinalis* L., собранной в различные фазы развития. *Медицина в Кузбассе*. 2017;16(2):32–38.
6. Nguyen Thi Dung, et al. Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of the essential oil and the ethanol extract of *Cleistocalyx* (Roxb.) Merr and Perry buds. *Food and chemical toxicology*. 2008;46(12):3632–3639.
7. *Физиологические и биохимические методы анализа растений*. Калининград: Калининградский университет; 2000. 59 с.

8. Кинетические, биохимические и биологические методы анализа. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине специализации «Кинетические, биохимические и биологические методы анализа» для студентов специальности 04.05.01 «Фундаментальная и прикладная химия». Курган: Курганский государственный университет; 2016. 30 с.
9. Воскресенская ОЛ, Алябьева ЕА, Половникова МГ. *Большой практикум по биоэкологии*. Часть 1. Йошкар-Ола: МарГУ; 2006. 107 с.
10. Макаревич АМ, Решетников ВН. Антиоксидантная активность плодов *Vaccinium corymbosum* L. и *Vaccinium uliginosum* L. Доклады НАН Беларуси. 2011;55(5):76–80.
11. Фенольные соединения и их физиологические свойства. В: *Материалы второго Всесоюзного симпозиума по фенольным соединениям, 17–21 мая 1971 г.* Алма-Ата: [б. н.]; 1973. 238 с.
12. Злобин АА, Мартинсон ЕА, Оводов ЮС. Антиоксидантная и антимикробная активность пектинов ряда растений европейского севера России. *Известия Коми научного центра УрО РАН*. 2011;3(7):33–37.
13. Карабанов ИА. *Флавоноиды в мире растений*. Минск: Ураджай; 1981. 80 с.
14. Вольинетс АП. *Фенольные соединения в жизнедеятельности растений*. Минск: Беларуская навука; 2013. 283 с.
15. Медведев СС. *Физиология растений*. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского университета; 2004. 336 с.

## References

1. Rupasova, ZhA, Kutas EN, Ignatenko VA, et al. *Vliyanie sposobov razmnzheniya na himicheskiy sostav listev rasteniy sem. Brusnichnyie. Soobsh. II. Golubika vyisokaya* [The propagation method influence on the chemical composition of the Lingonberry family plant's leaves. Message II. Highbush blueberry]. *Izvestiya Akademii agrarnykh nauk Belarusi*. 1998;1:44–49. Russian.
2. Rupasova ZhA. *Vozdelyvaniye golubiki na torfyanykh vyrobokakh Pripyatskogo Poles'ya (fiziologo-biokhimicheskiye aspekty razvitiya)* [The cultivation of blueberries on peat mines of Pripyat Polesye (physiological and biochemical aspects of development)]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2016. 242 p. Russian.
3. Ehlenfeldt MK, Prior RL. Oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and phenolic and anthocyanin concentrations in fruit and leaf tissues of highbush blueberry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001;49:2222–2227.
4. Rupasova ZhA, Vasilevskaya TI, Krinitskaya NB, et al. *Vliyanie metoda vegetativnogo razmnzheniya na biokhimicheskiy sostav plodov* [Vegetative propagation method influence on the biochemical composition of *Vaccinium corymbosum* L. cultivar's fruits]. *Izvestiya NAN Belarusi. Seriya biologicheskikh nauk*. 2020;65(2):220–228. Russian.
5. Mal'tseva YeM, et al. *Antioksidantnaya i antiradikal'naya aktivnost' in vitro ekstraktov travy Sanguisorba officinalis L., sobrannoy v razlichnyye fazy razvitiya* [Antioxidant and antiradical activity *in vitro* of the extracts of the herb *Sanguisorba officinalis* L. collected in various phases of development]. *Meditsina v Kuzbasse*. 2017;16(2):32–38. Russian.
6. Nguyen Thi Dung, et al. Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of the essential oil and the ethanol extract of *Cleistocalyx (Roxb.) Merr and Perry* buds. *Food and chemical toxicology*. 2008;46(12):3632–3639.
7. *Fiziologicheskie i biokhimicheskie metody analiza rasteniy* [Physiological and biochemical methods of plant analysis]. Kaliningrad; Kaliningradskiy universitet; 2000. 59 p. Russian.
8. *Kineticheskie, biokhimicheskie i biologicheskie metody analiza. Metodicheskie ukazaniya k vyipolneniyu laboratornykh rabot po distsipline spetsializatsii «Kineticheskie, biokhimicheskie i biologicheskie metody analiza» dlya studentov spetsialnosti 04.05.01 «Fundamentalnaya i prikladnaya himiya»* [Kinetic, biochemical and biological methods of analysis. Guidelines for laboratory work in the discipline of specialization «Kinetic, biochemical and biological methods of analysis» for students majoring 04.05.01 «Fundamental and Applied Chemistry»]. Kurgan: Kurganskiy gosudarstvennyy universitet; 2016. 30 p. Russian.
9. Voskresenskaya OL, Alyabyisheva EA, Polovnikova MG. *Bolshoy praktikum po bioekologii. Chast 1* [Big workshop on bioecology. Part 1]. Yoshkar-Ola: MarGU; 2006. 107 p. Russian.
10. Makarevich AM, Reshetnikov VN. *Antioksidantnaya aktivnost plodov Vaccinium corymbosum L. i Vaccinium uliginosum L.* [Antioxidant activity of *Vaccinium corymbosum* L. and *Vaccinium uliginosum* L. fruits]. *Doklady NAN Belarusi*. 2011;55(5):76–80. Russian.
11. *Fenolnyie soedineniya i ih fiziologicheskie svoystva*. In: *Materialy vtorogo Vsesoyuznogo simpoziuma po fenolnyim soedineniyam 17–21 maya 1971 g.* Alma-Ata [Phenolic compounds and their physiological properties: materials of the 2<sup>nd</sup> All-Union Symposium on Phenolic Compounds, 1971 May 17–21, Alma-Ata]. Alma-Ata: [publisher unknown]; 1973. 238 p. Russian.
12. Zlobin AA, Martinson EA, Ovodov YuS. *Antioksidantnaya i antimikrobnaya aktivnost pektinov ryada rasteniy evropeyskogo severa Rossii* [Antioxidant and antimicrobial activity of pectins of a number of plants in the European North of Russia]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN*. 2011;3(7):33–37. Russian.
13. Karabanov IA. *Flavonoidy v mire rasteniy* [Flavonoids in the plant's world]. Минск: Uradzhay; 1981. 80 p. Russian.
14. Volyinets AP. *Fenolnyie soedineniya v jiznedeyatel'nosti rasteniy* [Phenolic compounds in the plant's life]. Минск: Belaruskaja navuka; 2013. 283 p. Russian.
15. Medvedev SS. *Fiziologiya rasteniy* [Plant Physiology]. Saint Petersburg: Izdatelstvo Sankt-Peterburgskogo universiteta; 2004. 336 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 12.12.2020.  
Received by editorial board 12.12.2020.

УДК 502.173/174:621.357(043.3)

## ПОЛУЧЕНИЕ НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИХ ПИГМЕНТОВ ИЗ ЖИДКИХ ОТХОДОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

О. С. ЗАЛЫГИНА<sup>1)</sup>, В. И. ЧЕПРАСОВА<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный технологический университет,  
ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

Отработанные электролиты гальванического производства характеризуются высоким содержанием ионов тяжелых металлов, которое значительно превышает их количество в природных рудах. Показана возможность переработки отработанных сульфатных электролитов никелирования гальванического производства с получением пигментов, что позволит стабилизировать работу очистных сооружений, предотвратить попадание в окружающую среду ионов тяжелых металлов, которые обладают токсичным, мутагенным и канцерогенным действиями, снизить объемы образующихся осадков сточных вод, а также получить ценный товарный продукт, который в настоящее время пользуется спросом за рубежом. Представлены результаты исследований колористических характеристик полученных образцов пигментов, исследовано влияние ионов Fe (III), присутствующих в отработанных электролитах никелирования в качестве загрязняющей примеси, на колористические характеристики и чистоту цвета полученных образцов. Установлена зависимость цветности полученных образцов от содержания ионов Fe (III) в отработанных электролитах, позволяющая установить диапазон колористических характеристик пигментов, получаемых из отработанных сульфатных электролитов никелирования (зеленой, желтой, коричневой и черной цветовой гаммы). Результаты проведенных исследований предоставят возможность снизить воздействие гальванического производства на окружающую среду.

**Ключевые слова:** отход; отработанный электролит; никелирование; пигмент; цвет; яркость; чистота цвета; примеси.

## OBTAINING NICKEL-CONTAINING PIGMENTS FROM LIQUID WASTE GALVANIC PRODUCTION

V. S. ZALYHINA<sup>a</sup>, V. I. CHEPRASOVA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State Technological University,  
13a Sviardlova Street, Minsk 220006, Belarus  
Corresponding author: V. Zalyhina (zolha@tut.by)

Spent electrolytes from galvanic production are characterized by a high content of heavy metal ions, which significantly exceeds their content in natural ores. The paper shows the possibility of processing spent sulfate electrolytes from nickel plating of galvanic production to obtain pigments, which will stabilize the operation of treatment facilities, prevent the ingress of heavy metal ions into the environment, which have toxic, mutagenic and carcinogenic effects, reduce the volume of wastewater sludge formed, and also obtain a valuable commodity product that is currently being purchased abroad.

### Образец цитирования:

Залыгина ОС, Чепрасова ВИ. Получение никельсодержащих пигментов из жидких отходов гальванического производства. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2021;2:84–92.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-84-92>

### For citation:

Zalyhina VS, Cheprasova VI. Obtaining nickel-containing pigments from liquid waste galvanic production. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;2:84–92. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-84-92>

### Авторы:

**Ольга Сергеевна Залыгина** – кандидат технических наук; доцент кафедры промышленной экологии.  
**Виктория Игоревна Чепрасова** – кандидат технических наук; младший научный сотрудник Центра физико-химических методов исследования.

### Authors:

**Volha S. Zalyhina**, PhD (engineering); associate professor at the department of industrial ecology.  
[zolha@tut.by](mailto:zolha@tut.by)  
**Victoria I. Cheprasova**, PhD (engineering); junior researcher at the Center for physical and chemical research methods.  
[vicacheprasova@gmail.com](mailto:vicacheprasova@gmail.com)

The results of investigations of the coloristic characteristics of the obtained samples of pigments are presented, the effect of Fe (III) ions present in the spent electrolytes of nickel plating as a contaminant on the color characteristics and purity of the color of the obtained samples is investigated. The dependence of the color of the obtained samples on the content of Fe (III) ions in the spent electrolytes was established, which made it possible to establish the range of coloristic characteristics of pigments obtained from spent sulfate nickel-plating electrolytes (green, yellow, brown and black colors). The results of the research carried out will reduce the impact of galvanic production on the environment.

**Keywords:** waste; waste electrolyte; nickel plating; pigment; color; brightness; color purity; impurities.

## Введение

Переработка отходов производства является одной из важнейших задач, так как ее решение позволит снизить негативное воздействие на окружающую природную среду и обеспечить более эффективное использование природных ресурсов. Перспективным вторичным материальным ресурсом являются отработанные электролиты гальванического производства, которые характеризуются высокой концентрацией ионов тяжелых металлов.

В настоящее время в большинстве случаев проводят регенерацию отработанных электролитов [1]. Число циклов регенерации велико, однако ограничено вследствие накопления примесей, удаление которых не представляется возможным. Поэтому возникает необходимость замены электролитов, которая также может осуществляться в случае изменения их состава или номенклатуры выпускаемых изделий. Отработанные электролиты образуются также в ваннах улавливания, которые используются для снижения выноса компонентов электролита в промывные воды, а также при проведении ремонта оборудования, например, при сливе кубового остатка кассетных фильтров, используемых в системе регенерации электролитов. Проблема образования отработанных электролитов особенно актуальна для крупных предприятий, поскольку при больших объемах производства их количество возрастает вследствие увеличения скорости их загрязнения.

В действующем законодательстве отсутствует четкое разграничение между понятиями «концентрированные сточные воды» и «жидкие отходы», поэтому на многих предприятиях отработанные электролиты рассматриваются как сточные воды и сбрасываются на очистные сооружения совместно с промывными сточными водами, в которых концентрация ионов тяжелых металлов в сотни раз ниже [2]. Это затрудняет работу очистных сооружений вследствие периодического повышения концентрации загрязняющих веществ в сточной воде либо требует значительного количества чистой воды для предварительного разбавления концентрированных отработанных электролитов.

В соответствии с Классификатором отходов, образующихся в Республике Беларусь, отработанные электролиты являются отходами производства, вследствие чего встает вопрос правомерности их сброса на очистные сооружения.

Сброс отработанных электролитов на очистные сооружения совместно с промывными сточными водами приводит к безвозвратной потере ценных компонентов, а также к риску попадания в окружающую среду ионов тяжелых металлов, которые обладают токсичным, мутагенным и канцерогенным действиями. Высокая концентрация в отработанных электролитах гальванического производства ионов тяжелых металлов, соединения которых обладают хромофорными свойствами, позволяет предположить перспективность их использования для получения пигментов.

Учитывая, что в Республике Беларусь отсутствует производство пигментов и промышленность страны полностью работает на привозном сырье, то для уменьшения объема его импорта, а также для снижения воздействия гальванического производства на окружающую среду актуальным становится получение пигментов на основе отходов производства, в частности, из отработанных электролитов гальванического производства.

## Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись отработанные сульфатные электролиты никелирования (ОЭН), модельные отработанные электролиты никелирования (МОЭН), а также образцы пигментов, которые были получены из отработанных электролитов и модельных растворов путем осаждения ионов никеля гидроксидом или фосфатом натрия с последующей отмывкой от водорастворимых солей, обезвоживанием и термообработкой [3; 4].

Отбор проб ОЭН проводился с 2014 по 2017 г. на различных белорусских предприятиях. Основными компонентами исследуемых ОЭН являются сульфат никеля  $\text{NiSO}_4$  (130–250 г/дм<sup>3</sup>), борная кислота  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (30–40 г/дм<sup>3</sup>), хлорид натрия  $\text{NaCl}$  (10–15 г/дм<sup>3</sup>). Концентрацию ионов Ni (II) в ОЭН определяли титриметрическим методом с мурексидом [5]. Результаты представлены в табл. 1.

Состав модельных растворов был выбран на основании составов ОЭН:  $\text{NiSO}_4$  75 г/дм<sup>3</sup>,  $\text{H}_3\text{BO}_3$  30 г/дм<sup>3</sup>,  $\text{NaCl}$  10 г/дм<sup>3</sup>. Для их приготовления использовали следующие реактивы марок «ХХ» и «ЧДА»: сульфат

никеля  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  по ГОСТ 4465–74, борную кислоту  $\text{H}_3\text{BO}_3$  по ГОСТ 9656–75, хлорид натрия  $\text{NaCl}$  по ГОСТ 4233–77, а также дистиллированную воду по ГОСТ 6709–72. МОЭН готовили с различным содержанием ионов  $\text{Fe}$  (III) от 0 до 2 г/дм<sup>3</sup> (табл. 2). Концентрацию ионов  $\text{Fe}$  (III) в фильтрах, полученных после осаждения ионов  $\text{Ni}$  (II), определяли фотометрическим методом с сульфосалициловой кислотой<sup>1</sup>.

Таблица 1

Составы отработанных электролитов никелирования

Table 1

Compositions of spent electrolytes nickel plating

Номер пробы	Дата отбора пробы	Концентрация Ni (II), г/дм <sup>3</sup>	pH
Предприятие № 1			
1–1	08.12.2014	51,42	3,2
1–2	06.07.2015	49,54	3,3
1–3	14.12.2015	52,61	3,3
1–4	18.07.2016	51,78	3,2
1–5	05.12.2016	54,17	3,4
1–6	10.07.2017	52,92	3,2
Предприятие № 2			
2–1	24.11.2014	76,15	4,7
2–2	10.07.2015	77,91	4,7
2–3	19.10.2015	73,84	4,7
2–4	11.07.2016	77,34	4,5
2–5	26.11.2016	75,72	4,9
2–6	15.05.2017	76,51	4,7
Предприятие № 3			
3–1	21.04.2014	95,45	5,2
3–2	27.05.2016	91,17	5,2
3–3	15.09.2016	89,70	5,3
3–4	12.12.2016	89,58	5,2
3–5	24.04.2017	91,76	5,2
3–6	09.10.2017	94,15	5,2

Определение расхода осадителя для осаждения ионов  $\text{Ni}$  (II) из ОЭН проводили с использованием метода прямого потенциометрического титрования [6]. Измерение pH осуществляли с помощью pH-метра И-160М, оснащенного комбинированным стеклянным электродом марки ЭСКЛ-08.М1, диапазон измерений 0–12, точность измерения  $\pm 0,2$  единицы pH.

Рентгенофазовый анализ полученных образцов проводили на рентгеновском дифрактометре D8 Advance Bruker AXS (Германия), детектор – скintилляционный счетчик. Запись осуществлялась в диапазоне углов  $2\theta$ , 10–80° с шагом 0,1–0,2° 33 и накоплением импульсов в течение 2 с. Идентификация полученных рентгенограмм проводилась с применением специализированного программного обеспечения Match 1.10.1.446 и базы данных ICDD PDF-2.

Термогравиметрический анализ осуществляли с помощью термоаналитической системы TGA/DSC–1/1600 HF (METTLER TOLEDO Instruments, Швейцария) с использованием в качестве эталона  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (платиновые тигли, скорость нагревания 10 °С/мин, масса навески образцов 30,1–30,2 мг). Относительная погрешность определения массы  $\pm 0,1$  мг, относительная погрешность измерения температуры 0,15 %. Определение дисперсности полученных образцов проводили на лазерном анализаторе размеров частиц Analizette 22 Micro Tec (Fritsch GmbH, Германия). Диапазон измерений 0,1–600 мкм.

<sup>1</sup>СТБ 17.13.05–45–2016. Охрана окружающей среды. Аналитический контроль и мониторинг. Качество воды. Определение концентрации железа общего фотометрическим методом с сульфосалициловой кислотой. Утвержден постановлением Госстандарта Республики Беларусь от 23 мая 2016 г. № 37.

Составы модельных отработанных электролитов никелирования

Table 2

Compositions of model spent electrolytes nickel plating

Концентрация, г/дм <sup>3</sup>			
NiSO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	NaCl	Fe <sup>3+</sup>
75	30	10	0
			0,1
			0,2
			0,5
			1,0
			1,5
			2,0

Определение остатка на сите после мокрого просеивания осуществляли по ГОСТ 21119.4–75 «Общие методы испытаний пигментов и наполнителей. Методы определения остатка на сите»; рН водной суспензии проводили по ГОСТ 21119.4–75 «Общие методы испытаний пигментов и наполнителей. Определение рН водной суспензии», а маслосоемкости – по ГОСТ 21119.8–75 «Общие методы испытаний пигментов и наполнителей. Определение маслосоемкости».

Для характеристики цвета полученных образцов использовали трехмерную модель CIE 1976 L\*a\*b\*. В этой модели цвет определялся яркостью L\* и двумя хроматическими компонентами a\* и b\*, которые соответствуют изменению цвета от зеленого к красному и от синего к желтому соответственно. Яркость L\* находится в диапазоне от 0 до 100 (от самого темного до самого светлого).

Цветовые характеристики полученных образцов определяли с помощью автономного универсального спектрофотометра Color Eye XTH (Gretag Macbeth). На основании хроматических компонентов a\* и b\* для каждого образца была рассчитана чистота цвета C:

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}.$$

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования, проведенные нами ранее, дали возможность получить из отработанных сульфатных электролитов никелирования пигменты различной цветовой гаммы. Исходя из состава существующих пигментов и необходимости наиболее полного извлечения ионов никеля из отработанных электролитов никелирования, в качестве осадителей использовались гидроксид или фосфат натрия. На основании потенциометрического титрования были установлены условия наиболее полного извлечения ионов никеля из отработанных электролитов никелирования, которые являются многокомпонентными системами сложного состава. Так, при использовании в качестве осадителя гидроксида натрия наиболее полное осаждение ионов никеля наблюдается при рН > 13 и соотношении осадителя к осаждаемому катиону 1,35. При осаждении фосфатом натрия осаждение рекомендуется проводить при рН = 10 и соотношении осадителя и осаждаемого катиона 0,9. При этом степень извлечения ионов Ni (II) составляет более 99 %. После осаждения осуществляли отмывку от водорастворимых солей, сушку при температуре 80 °С и термообработку. Режим термообработки выбирали на основании данных термогравиметрического анализа. Термообработку образцов, полученных при осаждении ионов никеля гидроксидом натрия, осуществляли при температуре 230 °С, фосфатом натрия – 880 °С с выдержкой при максимальной температуре в течение часа. Определены технические характеристики полученных материалов (содержание основного компонента в пересчете на NiO, содержание водорастворимых солей, дисперсность, маслосоемкость, рН водной суспензии), которые свидетельствуют о возможности их использования в качестве пигментов. Однако основным свойством для любого пигмента являются его колористические характеристики – цвет, яркость и чистота. Цвет пигментов, полученных осаждением ионов никеля из отработанных сульфатных электролитов никелирования, зависит прежде всего от вида осадителя и условий термообработки. На основании данных рентгенофазового анализа был определен состав образующихся продуктов. При осаждении ионов никеля гидроксидом натрия после отмывки от водорастворимых солей и сушки был получен пигмент зеленого цвета, содержащий смесь 3Ni(OH)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O; Ni<sub>1,945</sub>O<sub>3</sub>H<sub>0,815</sub> и Ni<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(OH)<sub>4</sub>; после его термообработки

при температуре 230 °С – NiO черного цвета. При использовании в качестве осадителя фосфата натрия образуется зеленый пигмент, представляющий собой  $Ni_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ , который после термообработки при 880 °С подвергается дегидратации с образованием  $Ni_3(PO_4)_2$  желтого цвета [3; 4].

Цвет пигментов, получаемых осаждением ионов никеля из отработанных сульфатных электролитов никелирования, зависит не только от вида осадителя и условий термообработки, но и от наличия в отработанном электролите других красящих примесей, к которым относятся соединения железа, присутствующие в отработанных электролитах вследствие их загрязнения в процессе эксплуатации. Поэтому было проведено исследование влияния примесей соединений железа на цветовые характеристики пигментов, полученных из отработанных сульфатных электролитов никелирования. Для этого использовали модельные отработанные электролиты сульфатного никелирования с различным содержанием ионов Fe (III) (от 0 до 2,0 г/дм<sup>3</sup>). В табл. 3 представлены результаты осаждения ионов никеля из МОЭН с различным содержанием ионов Fe (III) гидроксидом и фосфатом натрия.

Таблица 3

**Влияние содержания ионов Fe (III) на выход осадка при осаждении ионов никеля из модельных отработанных электролитов никелирования**

Table 3

**Influence of Fe (III) ion content on precipitate yield during deposition of nickel ions from model spent nickel plating electrolytes**

Концентрация ионов Fe (III) в МОЭН, г/дм <sup>3</sup>	Выход осадка, г из 1 дм <sup>3</sup> ОЭН	Остаточная концентрация ионов Ni (II) в фильтрате, мг/дм <sup>3</sup>	Остаточная концентрация ионов Fe (III) в фильтрате, мг/дм <sup>3</sup>
<b>Осадитель – гидроксид натрия</b>			
0	61,1	0,125	0,144
0,1	61,2	0,127	0,135
0,2	61,4	0,126	0,129
0,5	62,1	0,131	0,150
1,0	63,2	0,125	0,131
1,5	63,5	0,135	0,139
2,0	64,5	0,115	0,140
<b>Осадитель – фосфат натрия</b>			
0	212,4	1,453	0,164
0,1	212,7	1,411	0,156
0,2	212,9	1,446	0,161
0,5	213,7	1,457	0,145
1,0	215,0	1,513	0,149
1,5	216,4	1,406	0,151
2,0	217,7	1,384	0,147

Незначительное увеличение количества образующегося осадка с увеличением концентрации ионов Fe (III) в исходных растворах связано с соосаждением ионов железа и ионов никеля.

Колористические характеристики полученных образцов представлены на рис. 1, 2 и в табл. 4, 5. При использовании в качестве осадителя гидроксида натрия увеличение содержания ионов Fe (III) от 0 до 2 г/дм<sup>3</sup> в МОЭН приводит к смещению оттенка образцов из области зеленого цвета в сторону области желтого цвета (линия АБ на рис. 1). При этом также происходит снижение яркости L\* высушенных образцов от 72,86 до 55,36, то есть на 24,0 % (рис. 2а; табл. 4). Увеличение содержания ионов Fe (III) в МОЭН до 0,2 г/дм<sup>3</sup> практически не влияет на чистоту цвета С, о чем свидетельствует рассчитанное значение ΔС (табл. 4). Дальнейшее увеличение содержания ионов Fe (III) приводит к снижению чистоты цвета С до 25,5, то есть на 21,8 % по сравнению с нулевым образцом (рис. 2; табл. 4).

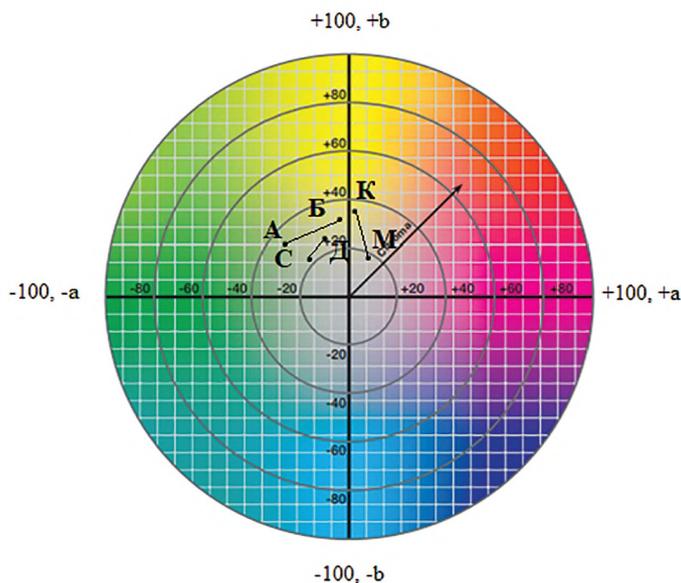


Рис. 1. Колористические характеристики образцов, полученных осаждением ионов Ni (II) из модельных отработанных электролитов никелирования с различным содержанием ионов Fe (III) растворами гидроксида и фосфата натрия после высушивания и прокаливания

Fig. 1. Color characteristics of samples obtained by precipitation of Ni (II) ions from model spent nickel plating electrolytes with different contents of Fe (III) ions by solutions of sodium hydroxide and phosphate after drying and calcination

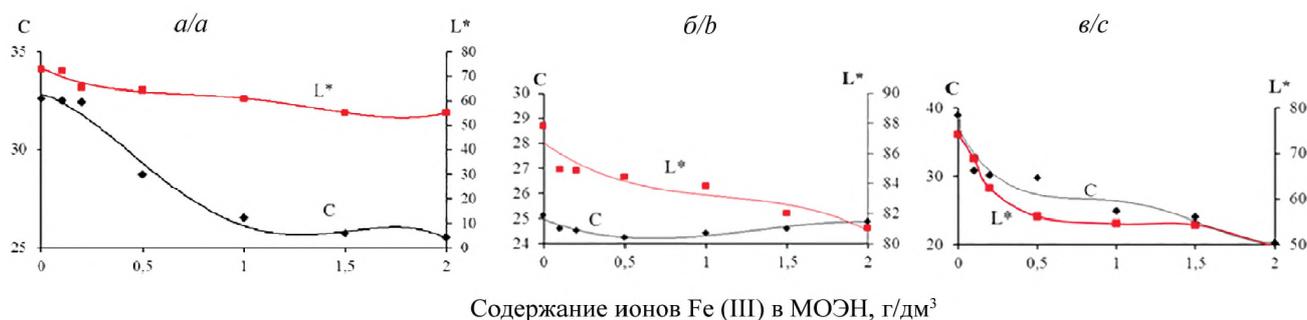


Рис. 2. График зависимости яркости  $L^*$  и чистоты цвета  $C$  от содержания ионов Fe (III) образцов, полученных осаждением ионов Ni (II) из модельных отработанных электролитов никелирования растворами гидроксида и фосфата натрия после высушивания и прокаливания

Fig. 2. Graph of the dependence of the brightness  $L^*$  and color purity  $C$  on the content of Fe (III) ions of samples obtained by precipitation of Ni (II) ions from model spent nickel plating electrolytes with solutions of sodium hydroxide and phosphate after drying and calcination

Установлено, что наличие ионов Fe (III) в ОЭН не влияет на цвет пигментов, полученных осаждением ионов никеля гидроксидом натрия с последующей термообработкой, так как в этом случае образуется оксид никеля черного цвета. Независимо от содержания соединений железа все образцы пигментов характеризуются идентичными хроматическими компонентами ( $a^* = 0,11-0,13$ ,  $b^* = 0,88-0,98$ ), которые соответствуют цвету, близкому к черному, и яркостью  $L^* = 22,88-23,12$ .

При использовании в качестве осадителя фосфата натрия увеличение содержания ионов Fe (III) от 0 до 2,0 г/дм<sup>3</sup> в МОЭН приводит к смещению оттенка образцов из зеленой области в желтую (линия СД, рис. 1). При этом также происходит снижение яркости  $L^*$  в образцах после высушивания от 87,84 до 81,06, то есть на 8,4 % (рис. 2 б; табл. 5). Чистота цвета при этом практически не меняется (колеблется в пределах от 24,25 до 25,12).

Для образцов, полученных после термообработки при 880 °С, увеличение содержания ионов Fe (III) от 0 до 2,0 г/дм<sup>3</sup> в МОЭН приводит к смещению оттенка образцов из области желтого цвета в область коричневого цвета (линия КМ, рис. 1), при этом наблюдается снижение яркости  $L^*$  от 74,19 до 49,63 (на 33,1 %) и чистоты цвета  $C$  от 38,92 до 20,27 (на 47,9 %) (рис. 2 в; табл. 5).

Цветовые характеристики пигментов, полученных из ОЭН различных белорусских предприятий, представлены в табл. 6. Области цветовых характеристик пигментов показаны на рис. 3.

Таблица 4

**Колористические характеристики образцов, полученных осаждением ионов никеля из модельных отработанных электролитов никелирования гидроксидом натрия**

Table 4

**Color characteristics of samples obtained by precipitation of Ni (II) ions from model waste electrolytes nickel plating with sodium hydroxide**

Содержание ионов Fe (III) в МОЭН, г/дм <sup>3</sup>	L*	a*	b*	C*	ΔL*	ΔC
Образцы после сушки						
0	72,86	-25,01	20,91	32,6	–	–
0,1	72,02	-24,83	20,95	32,5	0,84	0,1
0,2	65,53	-24,52	21,19	32,4	6,49	0,1
0,5	64,40	-16,48	23,44	28,7	1,13	3,7
1,0	61,05	-10,54	24,35	26,5	3,35	2,2
1,5	55,40	-6,54	24,87	25,7	5,65	0,8
2,0	55,36	-4,00	25,22	25,5	0,04	0,2

Таблица 5

**Колористические характеристики образцов, полученных осаждением ионов никеля из модельных отработанных электролитов никелирования фосфатом натрия**

Table 5

**Color characteristics of samples obtained by the precipitation of Ni (II) ions from model spent electrolytes of nickel plating with sodium phosphate**

Содержание ионов Fe (III) в МОЭН, г/дм <sup>3</sup>	L*	a*	b*	C	ΔL*	ΔC
Образцы после сушки						
0	87,84	-17,00	18,50	25,12	–	–
0,1	84,94	-16,37	18,38	24,61	2,90	0,51
0,2	84,87	-15,44	19,06	24,53	0,07	0,08
0,5	84,46	-14,62	19,35	24,25	0,41	0,28
1,0	83,86	-13,91	20,09	24,43	0,60	-0,18
1,5	81,98	-12,72	21,06	24,60	1,88	-0,17
2,0	81,06	-11,46	22,17	24,90	0,92	-0,30
Образцы после обжига						
0	74,19	0,60	38,92	38,92	–	–
0,1	68,87	1,72	30,79	30,84	5,32	8,08
0,2	62,39	2,05	30,08	30,14	6,48	0,70
0,5	56,14	2,24	29,67	29,75	6,25	0,39
1,0	54,63	4,68	24,44	24,88	1,51	4,87
1,5	54,41	5,11	23,52	24,07	0,22	0,81
2,0	49,63	7,26	18,92	20,27	4,78	3,80

Цветовые характеристики образцов, полученных из отработанных электролитов никелирования различных белорусских предприятий

Table 6

Color characteristics of samples obtained from spent electrolytes of nickel plating of various Belarusian enterprises

Предприятие	Образцы после сушки				Образцы после обжига			
	L*	a*	b*	C	L*	a*	b*	C
Осадитель – гидроксид натрия								
1	71,02	-24,73	21,03	32,46	22,98	0,11	0,88	0,89
2	72,35	-24,98	20,35	32,22	22,88	0,11	0,96	0,96
3	65,82	-24,72	22,19	33,22	22,85	0,15	0,93	0,94
Осадитель – фосфат натрия								
1	86,45	-16,56	18,41	24,76	69,87	1,55	31,85	31,89
2	87,29	-17,79	17,98	25,29	73,97	0,65	38,54	38,55
3	85,11	-16,11	18,24	24,34	65,49	1,75	31,67	31,72

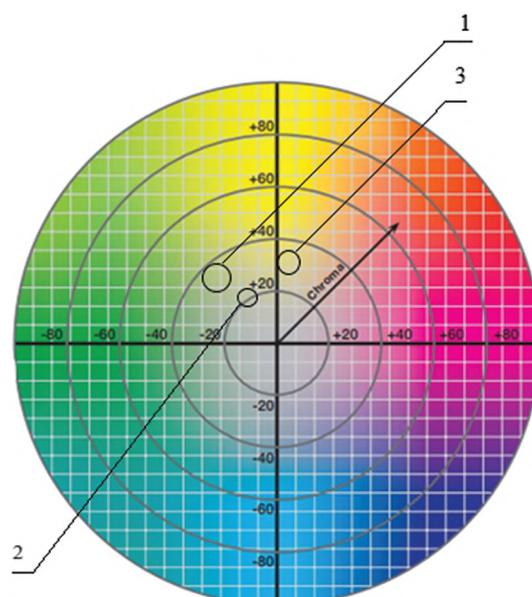


Рис. 3. Колористические характеристики образцов, полученных из отработанных электролитов никелирования:  
1 –  $3\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Ni}_{1,945}\text{O}_3\text{H}_{0,815}$  и  $\text{Ni}_2\text{O}_2(\text{OH})_4$ ; 2 –  $\text{Ni}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ; 3 –  $\text{Ni}_3(\text{PO}_4)_2$

Fig. 3. Color characteristics of samples obtained from spent nickel plating electrolytes:  
1 –  $3\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Ni}_{1,945}\text{O}_3\text{H}_{0,815}$  и  $\text{Ni}_2\text{O}_2(\text{OH})_4$ ; 2 –  $\text{Ni}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ; 3 –  $\text{Ni}_3(\text{PO}_4)_2$

Для полученных образцов пигментов были также определены другие свойства: массовая доля соединений никеля в пересчете на NiO составила от 60 до 97 % (в зависимости от осадителя, условий термообработки и исходного состава отработанного электролита), массовая доля веществ, растворимых в воде – не более 0,1 %, остаток после просеивания на сите № 0056 – не более 0,05 %, содержание частиц фракции 1–20 мкм от 14 до 28 %, частиц фракции 20–50 мкм от 40 до 56 %, pH водной суспензии от 7,1 до 7,3, маслосмекость от 48 до 85 г на 100 г пигмента. Свойства полученных никельсодержащих пигментов соответствуют свойствам пигментов, выпускаемых в настоящее время на мировом рынке (пигмент Nickel Yellow, Emperor industry Limited, Китай). Они прошли успешную апробацию в качестве пигмента в глазурях и мастике на ОАО «Керамин», что подтверждается результатами опытно-промышленных испытаний.

### Заклучение

Проведенные исследования подтверждают возможность использования отработанных электролитов никелирования для получения пигментов различной цветовой гаммы (зеленой, желто-коричневой, а также черного пигмента). Это позволит превращать жидкий отход гальванического производства в ценное вторичное сырье; получать ценный продукт (пигменты), который в настоящее время не производится в Республике Беларусь, а полностью поставляется из-за рубежа. Таким образом, это даст возможность снизить негативное воздействие гальванического производства на окружающую среду за счет снижения количества образующегося осадка сточных вод гальванического производства вследствие предотвращения сброса с промывными водами концентрированных отработанных электролитов.

### Библиографические ссылки

1. Виноградов СС. *Экологически безопасное гальваническое производство*. Москва: Глобус; 2002. 352 с.
2. Марцуль ВН и др. Очистка сточных вод гальванических цехов предприятий Республики Беларусь. *Труды БГТУ. Химическая технология неорганических материалов и веществ*. 2013;3:61–66.
3. Чеprasова ВИ, Залыгина ОС. Отработанные электролиты никелирования как вторичный сырьевой ресурс. *Природные ресурсы*. 2017;2:126–134.
4. Zalyhina V, Cheprasova V, Belyaeva V, Romanovski V. Pigments from spent Zn, Ni, Cu, and Cd electrolytes from electroplating industry. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;42:1–9.
5. Котик ФИ. *Ускоренный контроль электролитов, растворов и расплавов: справочник*. Москва: Машиностроение; 1978. 191 с.
6. Алов НВ, и др. *Основы аналитической химии*. Третье издание. Москва: Академия; 2004. 503 с.

### References

1. Vinogradov SS. *Ekologicheski bezopasnoye gal'vanicheskoye proizvodstvo* [Environmentally friendly galvanic production]. Moscow: Globus; 2002. 352 p. Russian.
2. Martsul VN, et al. *Ochistka stochnykh vod galvanicheskikh tsekhov predpriyatiy Respubliki Belarus'* [Wastewater treatment of galvanic workshops of enterprises of the Republic of Belarus]. *Proceedings of BSTU. Chemical technology of inorganic materials and substances*. 2013;3:61–66. Russian.
3. Cheprasova VI, Zalygina OS. *Otrabotannyye elektrolity nikelirovaniya kak vtorichnyy syr'yevoy resurs* [Waste electrolytes of nickel plating as a secondary raw material resource]. *Natural resources*. 2017;2:126–134. Russian.
4. Zalyhina V, Cheprasova V, Belyaeva V, Romanovski V. Pigments from spent Zn, Ni, Cu, and Cd electrolytes from electroplating industry. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;42:1–9.
5. Kotik FI. *Uskorennyy kontrol' elektrolitov, rastvorov i rasplavov: spravochnik* [Accelerated control of electrolytes, solutions and melts: a reference book]. Moscow: Mashinostroenie; 1978. 191 p. Russian.
6. Alov NV, et al. *Osnovy analiticheskoy khimii. Tret'e izdanie* [Fundamentals of analytical chemistry. 3<sup>rd</sup> edition]. Moscow: Academy; 2004. 503 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 21.04.2021.  
Received by editorial board 21.04.2021.

УДК 504.062

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ С УЧЕТОМ ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОГО СЫРЬЯ И ПРОИЗВОДИМОЙ ПРОДУКЦИИ

П. Н. ЗАХАРКО<sup>1)</sup>, С. А. ДУБЕНОК<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов,  
ул. Славинского 1/2, 220086, Минск, Беларусь

Регулирование водопользования на промышленных предприятиях, особенно на водоемких, в условиях изменяющегося климата является важной экономической и экологической задачей. Одним из способов устойчивого водопользования на предприятиях является постоянное планирование водопотребления и водоотведения в увязке с объемами и видами выпускаемой продукции. С точки зрения ученых, на водоемких предприятиях наиболее обоснованным подходом к оптимизации водопользования является разработка индивидуальных технологических нормативов водопользования (водопотребления и водоотведения). Предприятия по производству молочных продуктов являются достаточно водоемкими, водопользование которых зависит от ряда факторов: ассортимента исходного сырья для производства продукции и видов производимой продукции; диверсификации производственных процессов; образования и переработки побочных продуктов, что зачастую приводит к увеличению объема сточных вод по отношению к объему водопотребления; технологии санитарной обработки оборудования. Учитывая специфику производственных процессов, разработана Методика расчета водопользования для предприятий по производству молочных продуктов с учетом перерабатываемого сырья и производимой продукции. В ней обоснована необходимость изменения терминологии в части нормирования водопользования, разработаны критерии по выбору двух подходов к разработке индивидуальных технологических нормативов, детализированы статьи водопотребления и водоотведения, а также уточнены отдельные параметры их расчета. Апробация методики свидетельствует, что предложенные подходы и отдельные параметры расчета статей водопользования позволяют более точно прогнозировать предприятию объемы водопотребления и водоотведения при планировании производственной деятельности, что особенно актуально для водоемких отраслей в условиях ограниченности имеющихся водных ресурсов.

**Ключевые слова:** методика; водопотребление и водоотведение; индивидуальная технологическая норма водопользования; сырье; молочные продукты.

## METHODS FOR CALCULATING WATER USE FOR DAIRY PRODUCTS PRODUCTION ENTERPRISES, TAKING INTO ACCOUNT THE PROCESSED RAW MATERIALS AND TYPES OF PRODUCED PRODUCTS

P. N. ZAKHARKO<sup>a</sup>, S. A. DUBIANOK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Central Research Institute for Complex Use of Water Resources,  
1/2 Slavinskaya Street, Minsk 220086, Belarus  
Corresponding author: S. Dubianok (dsnega@list.ru)

### Образец цитирования:

Захарко ПН, Дубенок СА. Методика расчета водопользования для предприятий по производству молочных продуктов с учетом перерабатываемого сырья и производимой продукции. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;2:93–103.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-93-103>

### For citation:

Zakharko PN, Dubianok SA. Methods for calculating water use for dairy products production enterprises, taking into account the processed raw materials and types of produced products. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;2:93–103. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-93-103>

### Авторы:

**Полина Николаевна Захарко** – начальник отдела нормирования воздействия на окружающую среду.  
**Снежана Анатольевна Дубенок** – заместитель директора по научной работе.

### Authors:

**Palina N. Zakharko**, head of the department of regulation of environmental impact.  
[polina.k.85@mail.ru](mailto:polina.k.85@mail.ru)  
**Sniazhana A. Dubianok**, deputy director for research.  
[dsnega@list.ru](mailto:dsnega@list.ru)

Regulation of water use at industrial enterprises, especially at water-intensive enterprises, in a changing climate is an important economic and environmental task. One of the ways of sustainable water use at enterprises is the constant planning of water consumption and wastewater disposal in relation to the volumes and types of products produced. From a scientific point of view, at water-intensive enterprises, the most reasonable approach to optimizing water use is the development of individual technological standards for water use (water consumption and disposal). Dairy enterprises are quite water-intensive, the water use of which depends on a number of factors: assortment of raw materials for the production of products and types of products; diversification of production processes; the formation and processing of by-products, which often leads to an increase in the volume of wastewater formation in relation to the volume of water consumption; technologies for sanitizing equipment. Taking into account the specifics of production processes, a Methodology for calculating water use for enterprises for the production of dairy products, taking into account the processed raw materials and manufactured products, has been developed. The Methodology substantiates the need to change the terminology in terms of water use rationing, developed criteria for choosing two approaches to the development of individual technological standards for water use, detailed articles of water consumption and water disposal, and clarified certain parameters for their calculation. Approval of the Methodology showed that the proposed approaches and individual parameters for calculating water use items allow the enterprise to more accurately predict the volumes of water consumption and wastewater disposal when planning production activities, which is especially important for water-intensive industries in conditions of limited available water resources.

**Keywords:** technique; water consumption and water disposal; individual technological rate of water use; raw materials; milk products.

## Введение

Одним из способов устойчивого водопользования на предприятиях является постоянное планирование водопотребления и водоотведения в увязке с объемами и видами выпускаемой продукции. С научной точки зрения, на водоемких предприятиях наиболее обоснованным подходом к оптимизации водопользования является разработка индивидуальных технологических нормативов водопользования (водопотребления и водоотведения).

Индивидуальные технологические нормативы водопользования (ИТН) разрабатываются для целей:

- планирования предприятием производственной деятельности с учетом потребности в водных ресурсах и их наличия;
- установления предприятию ограничений на объем добычи (изъятия) водных ресурсов, сбросов сточных вод в сети канализации, окружающую среду;
- проектирования систем водоснабжения и канализации;
- контроля рациональности использования водных ресурсов на предприятии.

Методы расчета ИТН водопользования для предприятий различных видов экономической деятельности регламентированы документами<sup>1</sup>. Для предприятий по производству молочных продуктов РУП «Институт мясо-молочной промышленности» в 2007 г. разработана Инструкция по нормированию водопотребления и водоотведения в молочной промышленности (далее – Инструкция)<sup>2</sup>. В связи с расширением в последние десятилетия видов и ассортимента выпускаемой продукции, изменением ряда технологических процессов производства молочных продуктов и внедрением новых видов оборудования, методические подходы по разработке ИТН водопользования, изложенные в Инструкции, требуют доработки и уточнения.

**Общие методические подходы к расчету водопользования для предприятий по производству молочных продуктов.** Проведенный детальный анализ водопользования, технологических процессов производства молочных продуктов и используемого технологического оборудования на предприятиях по производству молочных продуктов позволил выделить ряд факторов, требующих учета при разработке ИТН водопользования:

1. Расширение ассортимента исходного сырья для производства продукции и изменение видов производимой продукции.

В качестве исходного сырья, помимо сырого молока, обезжиренного молока, сливок, может поступать сыворотка, а также иное продовольственное сырье (пахта, сухое цельное молоко, сухое обезжиренное молоко и др.). Для филиалов молочных предприятий (холдингов) характерна частая смена в течение месяца (года) видов производимой продукции, что влияет на характер водопользования.

<sup>1</sup>ТКП 17.02-13/1-2015 (33140). Охрана окружающей среды и природопользование. Технологические нормативы. Часть 1. Расчет технологических нормативов водопользования. Введ. 01.01.15. Минск: ПНИИКИВР; 2015. 38 с.

<sup>2</sup>Инструкция по нормированию водопотребления и водоотведения в молочной промышленности, РУП «Институт мясо-молочной промышленности». Утверждена первым заместителем Министра сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь в 2007 г.

2. Диверсификация производственных процессов.

Сырое молоко, поступающее на участок приемки (приемно-аппаратный участок), может проходить только частичную обработку (очистка, охлаждение) и далее передаваться для последующего использования иному предприятию (наиболее характерно для филиалов холдингов). Сыворотка, образующаяся при производстве молочных продуктов, может одновременно являться и побочным продуктом переработки молока, и сырьем при ее поступлении на предприятие для переработки.

3. Развитие технологий по переработке побочных продуктов при производстве молочных продуктов.

Образование побочного продукта переработки молока – сыворотки (творожная, подсырная, казеиновая) потребовало развития технологий по ее более глубокой переработке для производства молочных продуктов.

4. Дифференциация условий образования сточных вод и расширение спектра загрязняющих веществ в их составе.

В технологических процессах производства молочных продуктов возможно увеличение объема образования сточных вод по отношению к объему водопотребления на отдельных этапах производства: вторичный пар вакуум-выпарных установок (ВВУ), пермеат (при переработке сыворотки), ретенант (концентрат) (при подготовке воды). Санитарная обработка оборудования характеризуется использованием большого количества моющих (раствор азотной кислоты, щелочи) и дезинфицирующих средств, которые после использования, зачастую без их нейтрализации, отводятся в сети канализации.

5. Совершенствование (развитие) технологий санитарной обработки оборудования.

При санитарной обработке оборудования возможно использование емкостей повторной воды (вторичной воды), в которые поступает вода после последнего ополаскивания оборудования для последующей первой мойки оборудования.

Данные факторы не учтены в Инструкции, разработанной в 2007 г. для предприятий по производству молочных продуктов.

Методология разработки норм и нормативов водопользования была предложена в период существования СССР и включала следующие этапы: утверждение единого *методического подхода* для разработки норм и нормативов водопользования для различных отраслей промышленности «Методические указания по разработке норм и нормативов водопотребления и водоотведения с учетом качества потребляемой и отводимой воды в промышленности» [1]; разработка *отраслевых методик* норм и нормативов водопотребления и водоотведения в промышленности; разработка на основании отраслевых методик *индивидуальных норм* водопотребления и водоотведения для предприятия; разработка на основании индивидуальных норм водопользования *укрупненных норм* водопотребления и водоотведения для отрасли промышленности. При этом необходимо отметить, что в Методических указаниях, разработанных Украинским филиалом научно-исследовательского планирования и нормативов, расчет ИТН водопользования осуществляется как на сырье, так и на продукцию.

В настоящее время в Республике Беларусь методы и общие подходы к разработке технологических нормативов водопользования для предприятий различных видов экономической деятельности изложены в ТКП 17.02-13/1-2015, отраслевой методикой для предприятий по производству молочных продуктов является Инструкция, укрупненные нормы водопотребления и водоотведения для предприятий по производству молочных продуктов отсутствуют.

Согласно постановлению Минприроды № 21<sup>3</sup> и ТКП 17.02-13/1-2015 расчет ИТН водопользования основывается на:

– определении нормативного объема воды на производственные нужды ( $W_{пр}$ ); на нужды, не зависящие от производства продукции (использования сырья), но обусловленные производственным процессом ( $W_0$ ); на хозяйственно-питьевые нужды ( $W_{х-п}$ ) и определении соответствующих нормативных объемов образования сточных вод ( $S_{пр}$ ,  $S_0$ ,  $S_{х-б}$ );

– определение удельных показателей водопользования: индивидуальный технологический норматив водопотребления и индивидуальный технологический норматив водоотведения ( $N^B$ ,  $N^C$ ).

Итоговая формула для расчета ежесуточного (годового) расхода воды, образования сточных вод на 1 т переработанного сырья (1 т произведенной продукции i-го наименования) имеет следующий вид:

$$W = N_1^B \times P_1 + N_2^B \times P_2 + \dots + N_n^B \times P_n + W_0 + W_{х-п},$$

$$S = N_1^C \times P_1 + N_2^C \times P_2 + \dots + N_n^C \times P_n + S_0 + S_{х-б}.$$

<sup>3</sup>О некоторых вопросах разработки технологических нормативов водопользования. Постановление Министерства природных ресурсов Республики Беларусь, 4 мая 2015 г., № 21. Минск: [б. н.]; 2021.

Индивидуальный технологический норматив водопользования рассчитывается по формуле:

$$N^B = \frac{W_{np}}{P}, \quad N^C = \frac{S_{np}}{P},$$

где  $P$  – объем переработанного сырья (производимой продукции), т.

В Инструкции индивидуальная норма водопотребления рассчитывается как сумма норм расхода воды на производственные и хозяйственно-питьевые нужды, при этом вспомогательные нужды ( $W_0$  по сноске 1) включаются в норму расхода воды на производственные нужды, что не соответствует подходу к расчету ИТН согласно постановлению Минприроды № 21 и ТКП 17.02-13/1-2015. Кроме того, индивидуальная норма водоотведения рассчитывается как разница между индивидуальной нормой водопотребления и суммой норм на потери и безвозвратное водопотребление, что является некорректным при расчете нормы водоотведения для предприятий, осуществляющих производство сухих молочных продуктов, где объем водоотведения превышает водопотребление.

С учетом вышеизложенного, действующая Инструкция требует доработки как в части методических подходов в разработке ИТН водопользования, так и расчета отдельных статей водопользования. Поэтому с учетом имеющегося опыта разработки ИТН водопотребления и водоотведения для предприятий по производству различных видов молочных продуктов разработана *Методика расчета водопользования для предприятий по производству молочных продуктов с учетом перерабатываемого сырья и производимой продукции* (далее – *Методика*). В дальнейшем, разработанные на основании Методики индивидуальные технологические нормативы водопользования могут быть использованы для разработки укрупненных нормативов водопользования для предприятий по производству молочных продуктов.

Несмотря на то что, согласно постановлению Минприроды № 21, разработка ИТН водопользования для предприятий по производству молочных продуктов осуществляется только на единицу перерабатываемого сырья, в Методике предложено два подхода к разработке ИТН водопользования.

Необходимость применения двух подходов к расчету ИТН водопользования обусловлена расширением ассортимента исходного сырья для производства продукции, изменением на одном предприятии в течение месяца (года) видов производимой продукции, диверсификацией производственных процессов.

Расчет ИТН водопользования опирается на данные по количеству переработанного сырья, произведенных молочных продуктов из форм статистической отчетности: ведомственная отчетность формы 2 – молоко «Отчет об использовании сырья в организациях, осуществляющих переработку молока», 12 – продукты животноводства «Отчет о поставке продуктов животноводства», государственная статистическая отчетность 12-п «Отчет о производстве промышленной продукции (работ, услуг)».

Учет поступившего сырого молока ведется не в физическом весе, а путем его перевода в молоко базисной жирности. Также нормы расхода и фактические расходы молока переводятся на молоко базисной жирности. Для пересчета количества молока фактической жирности в базисное используется коэффициент 3,6.

При разработке ИТН на 1 т сырья учитывается сырье, поступившее на производство: сырое молоко, обезжиренное молоко, сливки и привозная сыворотка. При поступлении обезжиренного молока и сливок в незначительном количестве, их объемы допускается добавлять к общему объему поступившего сырого молока. В случае, когда обезжиренное молоко и сливки поступают в отдельный цех для производства конкретного вида продукции, расчет ИТН проводят отдельно на каждый вид поступившего сырья. ИТН на привозную сыворотку рассчитывается отдельно.

При разработке ИТН на 1 т продукции учитываются все виды молочных продуктов, указанные в формах статистической отчетности предприятия.

Критерии выбора подхода к расчету ИТН водопользования приведены ниже:

*Расчет ИТН водопользования на 1 т сырья*

1. На стадии проектирования предприятия по производству молочных продуктов с учетом проектной мощности предприятия и планируемого режима работы цехов.

2. При производстве до 3-х видов готовой продукции (например, сыр, масло и концентрированная (сухая) сыворотка).

3. При разработке ИТН водопользования на участок (цех) в случае, если его производственный процесс не завершается выпуском готовой продукции.

*Расчет ИТН водопользования на 1 т продукции*

1. При производстве более 3-х видов продукции в широком ассортименте.

2. При разработке ИТН водопользования на участок (цех) и в случае, если производственный процесс участка (цеха) завершается выпуском готовой продукции.

3. При значительном ежегодном изменении режимов работы оборудования, видов выпускаемой готовой продукции.

Проведенный анализ нормативных и технических нормативных правовых актов в области нормирования водопользования показал, что в Республики Беларусь в разных отраслях промышленности встречаются два термина при разработке балансов водопользования – норма и норматив водопотребления и водоотведения:

– Инструкция по нормированию водопотребления и водоотведения в молочной промышленности и Инструкция по нормированию водопотребления и водоотведения в мясной промышленности закрепляют разработку индивидуальных *норм* водопотребления и водоотведения.

– Постановление Министерства транспорта и коммуникаций от 19 мая 2008 г. № 67 «Об утверждении отраслевых технологических нормативов водопотребления и водоотведения для организаций, осуществляющих дорожную деятельность» закрепляет разработку отраслевых технологических *нормативов* водопотребления и водоотведения для организаций, осуществляющих дорожную деятельность.

– Методические инструкции по разработке индивидуальных технологических нормативов водопотребления и водоотведения для организаций Департамента по хлебопродуктам Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь закрепляет разработку индивидуальных *нормативов* водопотребления и водоотведения для предприятий хлебопекарной, макаронной, мукомольно-крупяной, комбикормовой и элеваторной промышленности.

При этом по отношению к расходу топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) для различных отраслей промышленности страны применим только термин «*норма*».

В Российской Федерации в ИТС 45-2017 Производство напитков, молока и молочной продукции [2] применяются термины «норма» и «*индивидуальная норма водопотребления и водоотведения*».

Таким образом, *норма* – это показатель включающий усредненный объем водопотребления по всем статьям расхода воды, то есть абсолютный показатель, характеризующий максимально допустимые объемы воды при изготовлении единицы продукции; *норматив* – объем водопотребления по конкретному оборудованию, линии и т. д., то есть относительный показатель, определяющий количественное соотношение плановых затрат и результатов производства. Во многих случаях нормативы превращаются в коэффициенты и являются расчетной основой для определения норм, их поэлементной составляющей (коэффициент использования металла, коэффициент сменности работы оборудования).

Учитывая вышеизложенное в Методике предложено использовать термин *индивидуальные (индивидуальные технологические) нормы водопотребления и водоотведения*. Также подходы к расчету ИТН водопользования приведены в ней в соответствии с требованиями ТКП 17.02-13/1-2015, разработаны критерии по выбору двух подходов к разработке ИТН водопользования, детализированы статьи водопотребления и водоотведения, а также уточнены отдельные параметры их расчета.

**Расчет водопользования по статьям потребления воды.** На основании имеющегося опыта разработки ИТН водопользования для различных предприятий по производству молочных продуктов, проведено структурирование всех статей по направлениям потребления воды, с целью определения нормативного объема воды на производственные нужды ( $W_{пр}$ ); на нужды, не зависящие от производства продукции (использования сырья), но обусловленные производственным процессом ( $W_0$ ); на хозяйственно-питьевые нужды ( $W_{х-п}$ ). Сводные данные приведены в табл. 1.

Далее более детально рассмотрены статьи водопользования, которые требовали уточнения в Инструкции и были учтены в разработанной Методике.

#### *Статья «Обеспечение технологических параметров оборудования»*

В связи с расширением спектра, применяемого на предприятиях по производству молочных продуктов водопотребляющего оборудования, а также развитием технологий по переработке побочных продуктов проведена детализация данной статьи водопользования. В табл. 2 приведен перечень оборудования, для которого необходимо проводить расчеты по статье «Обеспечение технологических параметров оборудования».

В рамках данной статьи для учета расхода воды предложено вводить *коэффициенты использования оборудования*, обоснованные в разработанной Методике.

Большая часть оборудования на предприятиях по производству молочных продуктов (сепараторы, гомогенизаторы, пастеризаторы, ВВУ и др.) при пуске-разогреве работают на холостом ходу, используя воду. Согласно Методическим рекомендациям по нормированию топливно-энергетических ресурсов<sup>4</sup> применяется коэффициент использования оборудования ( $k_{шт}$ ).

Коэффициент использования оборудования учитывает время работы оборудования в рабочем режиме и при пуске-разогреве при осуществлении технологической операции в пределах одного рабочего цикла.

<sup>4</sup>Методические рекомендации по нормированию топливно-энергетических ресурсов для организаций системы Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. Утверждены Министром сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь 15 августа 2017 г.

Рассчитывается он по формуле

$$K_{\text{вип}} = \tau_p / (\tau_{\text{п}} + \tau_p),$$

где  $\tau_p$ ,  $\tau_{\text{п}}$  – время работы оборудования в рабочем режиме и при пуске-разогреве соответственно.

Для всего оборудования (гомогенизатор, охладитель, установка для пастеризации, автоматы по розливу продукции, заквасочник и др.) введен коэффициент 0,8. Данный коэффициент предлагается также использовать и при расчете ИТН водопользования, при отсутствии данных, позволяющих проводить расчеты по вышеуказанной формуле.

Таблица 1

Сводные данные по статьям потребления воды

Table 1

Summary data on water consumption items

Статья	Наименование статьи
Производственные нужды ( $W_{\text{пр}}$ )	
1	Обеспечение технологических параметров оборудования (использование воды в процессе работы оборудования)
2	Санитарная обработка оборудования
3	Санитарная обработка автомолцистерн (наружная и внутренняя мойка)
4	Приготовление моющих растворов
5	Санитарная обработка производственных помещений
6	Санитарная обработка текстильных изделий (серпянки)
7	Приготовление рецептур
8	Приготовление рассола для соляных бассейнов
9	Расход воды на посол сыра в зерне
10	Расход воды на промывку казеина, промывку сырного зерна
11	Выработка пара (котельная)
11.1	Восполнение потерь конденсата пара
11.2	Продувка котла
11.3	Потери с выпаром деаэратора
11.4	Собственные нужды водоподготовки
12	Расход воды на подпитку оборотной системы вакуум-выпарной установки (ВВУ)
Нужды, не зависящие от производства продукции (используемого сырья), но обусловленные производственным процессом (вспомогательные нужды) ( $W_0$ )	
1	Нужды лаборатории
2	Водоподготовка питьевой воды
3	Профилактическая чистка и дезинфекция РЧВ, промывка водопроводной сети
4	Расход воды на подпитку оборотной системы аммиачной компрессорной
5	Подпитка тепловой сети
Хозяйственно-питьевые нужды	
1	Расход воды на питьевые нужды
2	Расход воды на принятие душа
3	Расход воды полив зеленых насаждений
4	Расход воды на мойку твердых покрытий
5	Расход воды на нужды прачечной
6	Влажная уборка непромышленных помещений
7	Расход воды на нужды столовой

Оборудование, использующее в процессе работы воду

Table 2

Equipment using water during operation

№	Название оборудования	Процесс, в котором задействована вода	Дополнительные потоки в канализацию
1	Гомогенизатор	Вода используется только в плунжерных гомогенизаторах. Плунжеры при работе сильно нагреваются от горячего продукта, который проникая через уплотнение, присыхает к поверхности плунжеров. Поэтому в гомогенизаторах находится специальное смывное приспособление, через которое на плунжеры подается вода, смывающая продукт	Нет. Отведение сточных вод от охлаждения осуществляется в сети канализации
2	Сепаратор-молокоочиститель, сепаратор-сливкоотделитель, бактофуга	Сепараторы самовыгружающиеся используют воду для выгрузки осадка, при этом весь барабан не моется и сепаратор не останавливается	При работе сепаратора образуется дополнительный поток в систему канализации: осадок, который сбрасывается из сепаратора; бактофугат, который сбрасывается из бактофуги
3	Заквасочник	Прямоточное охлаждение (водяная рубашка)	Нет. Отведение сточных вод от охлаждения осуществляется в сети канализации
4	Маслоизготовитель	Вода используется: – в сбивателе имеется рубашка холодной воды для охлаждения цилиндров; – для промывки масляного зерна в текстураторе (после удаления пахты масляное зерно промывается, вода для промывки удаляется из маслоизготовителя через отстойник); – в текстураторе для охлаждения пахты и масляного зерна	Нет. Отведение сточных вод от охлаждения и после промывки масляного зерна осуществляется в сети канализации
5	Маслообразователь	Вода может использоваться: – в рубашке для охлаждения продукта; – в случае перерыва в работе масло в цилиндрах затвердевает и для обогрева цилиндров в охлаждающую рубашку необходимо подать пар или горячую воду. Цилиндры после этого очистятся от продукта. Промывка цилиндров осуществляется горячей водой и специальными растворами	Нет. Отведение сточных вод от охлаждения и после промывки цилиндров осуществляется в сети канализации
6	Автоматы розлива, фасовочные автоматы, термоусадочная машина	Охлаждение механизма сварки поперечного шва и др.	Нет. Отведение сточных вод от охлаждения осуществляется в сети канализации
7	Мембранные установки для подготовки воды	Подготовка пастеризованной воды, воды для рецептов, воды для санитарной мойки мембранных установок	При работе образуется концентрат, который отводится в канализацию
7.1	Мембранные установки для переработки сырья	Используются в основном для концентрирования сыворотки и молока, перед их сушкой	При работе образуется пермеат, который отводится в канализацию
8	ВВУ	Охлаждение и обеспечение рабочего режима вакуум-насосов	При работе образуется вторичный пар, который после конденсации отводится в канализацию
9	Стерилизатор	Используется горячая вода перед запуском оборудования для его стерилизации	Нет. Вода после стерилизации оборудования отводится в сети канализации

*Статья «Санитарная обработка оборудования»*

Санитарная обработка оборудования может осуществляться ручным и механизированным способом. В настоящее время его большая часть на предприятиях по производству молочных продуктов преимущественно моется с использованием механизированного способа. Ручным способом моются съемные части оборудования, осуществляется наружный обмыв оборудования.

В зависимости от способа санитарной обработки предложены варианты расчета расхода воды при ручной и механизированной мойке.

При ручной санитарной обработке оборудования в моечных ваннах необходимо учитывать их количество, объем каждой секции, время и периодичность мойки оборудования. При ополаскивании оборудования в моечных ваннах с использованием проточной воды, при осуществлении наружного обмыва оборудования моечными шлангами учитывается диаметр шланга и времени его работы на одну единицу оборудования.

Механизированная санитарная обработка оборудования осуществляется с использованием балансиروочных бачков и емкостей СИП-моек. В балансируочных бачках вода и моющие растворы циркулируют в течение одного цикла мойки и далее сбрасываются в канализацию. СИП-мойки осуществляются в автоматическом режиме, при котором моющие растворы после цикла мойки возвращаются в специальные емкости и используются многократно. Также возможно использование емкостей повторной воды, в которые подается вода после последнего ополаскивания оборудования для последующей первой мойки оборудования.

Учитывая разнообразие видов оборудования, которое моется механизированным способом, в Методике детализирована данная статья расхода воды и предложены основные параметры к ее расчету:

– при использовании балансируочных бачков необходимо учитывать объем отдельно каждого, объем заполнения системы и количество заполнений на одну единицу оборудования в сутки;

– при использовании СИП-моек для основного технологического оборудования необходимо учитывать производительность насоса подачи воды, коэффициент использования его паспортной производительности, время его работы на один цикл мойки;

– при использовании СИП-моек для емкостного оборудования (резервуаров) рекомендуется расчет расхода воды осуществлять в соответствии с подходом, применяемым при разработке ИТН водопользования для предприятий по производству алкогольных и безалкогольных напитков, где норма расхода воды зависит от объема резервуара: для резервуара до  $10^3$  – расход воды 2 л/л дал емкости; от 10 до  $50 \text{ м}^3$  – 1,4 л/л дал емкости; от 50 до  $100 \text{ м}^3$  – 1,1 л/л дал емкости; свыше  $100 \text{ м}^3$  – 0,8 л/л дал емкости;

– при использовании в СИП-мойке емкостей повторной воды, необходимо отдельно рассчитывать объем повторного водоснабжения.

Следует отметить, что санитарная обработка производственных помещений в настоящее время может осуществляться не только с использованием моющих шлангов, но и моющих машин, что потребовало детализации расчета по данной статье водопотребления в Методике.

Санитарная обработка пола моющими машинами включает следующие этапы:

– подача моющего раствора или чистой воды из бака на щетку;

– вращение щетки и размывание загрязнений;

– сбор при помощи резиновых лезвий и вакуумной системы сточных вод в специальный бак.

При использовании моющих машин расход воды рассчитывается по объему бака, заполняемого водой с учетом количества его заполнения в сутки (год). Объем образования сточных вод при использовании моющих машин равен объему бака использованной воды и рассчитывается с учетом количества слива сточных вод из бака использованной воды в сутки (год).

Расчет расхода моющих средств для санитарной обработки оборудования и помещений осуществляется аналогично расчету расхода воды на санитарную обработку оборудования.

*Статья «Расход воды на нужды котельной»*

Основным направлением работы котельной на предприятии по производству молочных продуктов является выработка пара, который используется в различных технологических процессах:

– для подогрева молока (пластинчатый подогреватель, пастеризационно-охладительная установка, трубчатый теплообменник);

– при плавлении сырной массы, приготовлении сахарного сиропа (сироповарочный котел);

– при сгущении сырья в ВВУ;

– при ультрапастеризации молока путем использования прямого нагрева – впрыскивание (инжекция) пара в молоко или подача молока в среду пара;

– при дезинфекции оборудования паром и др.

При этом большая часть пара в виде конденсата должна возвращаться в котельную для повторного использования. Потери, связанные с невозвратом конденсата, обусловлены загрязнением пара при работе ВВУ и при ультрапастеризации молока путем использования прямого нагрева.

Проведенный анализ разработанных ИТН водопользования ряда предприятий показал, что зачастую все вышеперечисленные технологические процессы использования пара относятся к потерям, что является некорректным. Так как от всех технологических процессов, за исключением его конденсата после установок ВВУ, ультрапастеризации молока, пар возвращается в виде конденсата в котел. При этом возврат конденсата относится к повторному водоснабжению.

Статья «Расход воды на нужды котельной» включает ряд подстатей расхода воды на:

- восполнение потерь конденсата пара;
- продувку котлов;
- восполнение потерь с выпаром деаэратора;
- водоподготовку.

Наиболее водоемкой подстатьей является «расход воды на восполнение потерь конденсата пара», в связи с чем предложена уточненная формула для определения количества воды на восполнение потерь воды с конденсатом пара при производстве тепловой энергии:

$$W_{\text{пар}} = \frac{Q \cdot 10^6}{\rho \cdot r} \cdot (1 - \mu),$$

где  $Q$  – выработка тепловой энергии (пар) за анализируемый период согласно статистическим данным, Гкал;  
 $r$ ,  $\rho$  – удельная теплота парообразования и плотность воды,  $r = 477,35$  ккал/кг,  $\rho = 876$  кг/м<sup>3</sup>, для насыщенного пара давлением 11 бар;

$\mu$  – возврата конденсата согласно статистическим данным предприятия за анализируемый период.

Таким образом, в разработанной Методике приемы расчета ИТН водопользования приведены в соответствии с требованиями постановления Минприроды № 21 и ТКП 17.02-13/1-2015, обоснованы подходы к расчету ИТН водопользования, структурированы и детализированы отдельные статьи водопользования, уточнены входные данные для расчета водопользования. Это позволит в дальнейшем предприятиям по производству молочных продуктов более точно спрогнозировать объемы потребления воды и образования сточных вод при производстве различных видов продукции.

#### *Апробация Методики*

Внедрение Методики осуществлялось на предприятии с годовым объемом переработки молока базисной жирности 69126,7 т, из них 54493,3 т молока использовано для производства собственной продукции, 14677,4 т молока прошло частичную обработку и отгружено иному предприятию. Годовой объем производства продукции: масло – 343,7 т, сыр твердый – 4836 т, сырная масса – 6,1 т, полуфабрикат сырный свежий – 55,4 т, сыворотка сгущенная – 12078,8. На предприятии осуществляется концентрирование сыворотки на установке нанофльтрации GEA Filtration NF.

Проведен сравнительный анализ статей водопользования, рассчитанных для данного предприятия по Инструкции и по Методике. Сводные данные по двум подходам к расчету ИТН приведены в табл. 3.

Учитывая, что на анализируемом предприятии часть сырого молока проходит только частичную обработку и далее передается для использования иному производителю, проведен отдельный расчет водопользования на данный объем сырого молока (14677,4 т). Сводные данные приведены в табл. 4.

Дифференцированный подход, предложенный в Методике, позволил снизить нормы водопользования за счет детализации отдельных статей водопотребления и водоотведения, а также расчета отдельно норм водопользования на тонну молока базисной жирности, перерабатываемого для производства собственной продукции, и на тонну молока базисной жирности, отгружаемого после частичной обработки на иное предприятие.

Объем воды на санитарную обработку оборудования снижен на 18,5 %, суммарный объем воды по предприятию снижен на 12,1 %, и, соответственно, норма водопотребления снижена с 3,6 м<sup>3</sup>/т до 3,449 м<sup>3</sup>/т.

При этом соотношение объема образования сточных вод к объему водопотребления, полученное по Инструкции, составило 109 %, по Методике 112 %. Увеличение на 3 % данного соотношения обусловлено расчетом дополнительных объемов сточных вод, поступающих в сети канализации: осадок из сепаратора и бактофуги, конденсат после технологических процессов.

Таким образом, предложенные в Методике подходы и отдельные параметры расчета статьей водопользования позволяют более точно прогнозировать предприятию объемы водопотребления и водоотведения при планировании производственной деятельности, что особенно актуально для водоемких отраслей в условиях ограниченности имеющихся водных ресурсов.

Таблица 3

Сравнительный анализ статей водопользования по двум подходам  
к расчету индивидуальных технологических нормативов водопользования

Table 3

Comparative analysis of water use items according to two approaches  
to the calculation of individual technological standards for water use

Статья	Наименование статьи	по Инструкции		по Методике	
		вода	сточные воды	вода	сточные воды
Производственные нужды				Производственные нужды	
1	Обеспечение технологических параметров оборудования	11187,2	11187,2	10222,8	10555,5
2	Санитарная обработка оборудования	127995,4	127995,4	99787,0	99787,0
3	Приготовление химических растворов	1523,8	1523,8	1200,3	1200,3
4	Наружная и внутренняя мойка автомолцистерн	21313,5	21313,5	16958,0	16958,0
5	Мойка помещений	8286,3	7339,9	8286,3	7339,9
6	Приготовление рассола	360	360	360	360
7	Промывка зерна (сыроизготовитель)	10986	0	10986	0
8	Образование пермеата	0	34518,0	0	34518,0
9	Подпитка котла	1030,0	0	1378,6	1378,6
10	Продувка котла	30,0	0	233,28	233,28
11	Работа деаэрата	482,4	0	102,95	0
12	Водоподготовка	1160,9	1160,9	1160,9	1160,9
13	Лаборатория	167,9	167,9	167,9	167,9
Производственные нужды				Вспомогательные нужды	
14	Лаборатория	1404	1404	1404	1404
15	Станция обезжелезивания	5475	5475	5475	5475
16	Мойка РЧВ	41,2	41,2	41,2	41,2
17	Подпитка теплосети	290,6	0	290,6	0
18	Компрессорная	2380,5	280	2380,5	280
Хозяйственно-питьевые нужды					
19	Хозяйственно-питьевые и бытовые нужды	6697,1	6599,8	6697,1	6599,8
Итого по предприятию		<b>201027,5</b>	<b>219581,9</b>	<b>167132,1</b>	<b>187458,7</b>
Итого производственные нужды		<b>194330,4</b>	<b>212982,2</b>	<b>150843,7</b>	<b>173658,7</b>
<b>ИТН водопользования</b>		<b>3,6</b>	<b>3,9</b>	<b>2,8</b>	<b>3,2</b>

Таблица 4

Статьи водопользования с учетом отгрузки сырого молока

Table 4

Articles of water use, taking into account the shipment of raw milk

Статья	Наименование статьи	по Методике	
		вода	сточные воды
1	Обеспечение технологических параметров оборудования	45,9	104,6
2	Санитарная обработка оборудования	4581	4581
3	Приготовление химических растворов	323,5	323,5
4	Наружная и внутренняя мойка автомолцистерн	4571,2	4571,2
<b>Итого</b>		<b>9521,7</b>	<b>9580,4</b>
<b>ИТН водопользования</b>		<b>0,649</b>	<b>0,653</b>

## Заключение

Предприятия по производству молочных продуктов в связи со спецификой производственных процессов являются достаточно водоемкими. Кроме того, для них зачастую характерно увеличение объемов водоотведения по отношению к водопотреблению. В сложившихся условиях требуется более детальное изучение водопользования на предприятиях по производству молочных продуктов. В связи с чем разработана *Методика расчета водопользования для предприятий по производству молочных продуктов с учетом перерабатываемого сырья и производимой продукции*, позволяющая в дальнейшем предприятиям более точно прогнозировать объемы потребления воды и образования сточных вод при производстве различных видов молочных продуктов.

## Библиографические ссылки

1. Методические указания по разработке норм и нормативов водопотребления и водоотведения с учетом качества потребляемой и отводимой воды в промышленности [Интернет] : Письмо Госплана СССР, 12 июля 1979 г., № ВИ-1381-94-143. Электронный фонд правовой и научно-технической документации. [Процитировано 3 мая 2021]. Доступно по: <http://docs.cntd.ru/document/1200046183>.
2. ИТС 45-2017. Производство напитков, молока и молочной продукции. [Интернет]. Приказ Росстандарта, 29 ноября 2017 г., № 2668. Электронный фонд правовой и научно-технической документации. [Процитировано 3 мая 2021]. Доступно по: <http://docs.cntd.ru/document/556018151>.

## References

1. Guidelines for the development of norms and standards for water consumption and water disposal taking into account the quality of consumed and discharged water in industry. [Internet]. Letter from the State Planning Committee of the USSR, 1979 July 12, No. VI-1381-94-143. Electronic fund of legal and scientific-technical documentation. [Cited 2021 May 3]. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/1200046183>.
2. ITS 45-2017. Production of drinks, milk and dairy products. [Internet]. Order of Rosstandart, 2017 November 29, No. 2668. Electronic fund of legal and scientific and technical documentation. [Cited 2021 May 3]. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/556018151>.

*Статья поступила в редколлегию 05.05.2021.  
Received by editorial board 05.05.2021.*

---

---

# ПАМЯТИ ВЫДАЮЩИХСЯ УЧЕНЫХ

---

## IN MEMORY OF OUTSTANDING SCIENTISTS

---

---



---

---

**МИШАТКИНА**  
**Татьяна Викторовна**  
**MISHATKINA**  
**Tatyana Viktorovna**  
(05.12.1941 – 10.06.2021)

---

---

*Я боялась на свете жить,  
Я боялась вперед шагать,  
Я хотела всегда любить,  
Не могла я тогда понять:  
Чтобы жить, надо сильным быть  
Чтоб любить, надо жить вдвойне...*

«Поэтическая Сахаризация»  
Мария Алексеюк

Ушла Татьяна Викторовна Мишаткина, талантливый ученый, выдающийся педагог, замечательный человек, хрупкая и обаятельная женщина, любящая мать и бабушка. Не будет уже новых феерических выступлений, поражающих не только глубиной, но и блестящими, совершенно неожиданными идеями, заседаний студенческого

Дискуссионного клуба, клуба «Поэтическая Сахаризация» и др. Ее больше нет, но осталась наша о ней память – и пока она жива, Татьяна Викторовна будет жить в наших сердцах и делах.

Весь ее жизненный путь – это постоянный поиск своего места в жизни, самосовершенствование и борьба за свои идеи. Она сносила любые удары

судьбы и шла только вперед по выбранному пути, который был извилист и не усыпан розами.

В 1964 г. Татьяна Викторовна закончила с отличием Волгоградский педагогический институт. По первому образованию она филолог. Затем – череда переквалификаций, постоянная учеба. Как следствие, несколько дипломов ЮНЕСКО, грамоты и благодарности Министерства здравоохранения и Министерства образования, всех учреждений, где она в это время работала. Татьяна Викторовна награждена юбилейной медалью «25 лет Белорусской Ассоциации Клубов ЮНЕСКО». Она была постоянным и почетным участником всех Национальных Конгрессов по биоэтике Украины.

10 января 1975 г. Татьяна Викторовна успешно защитила кандидатскую диссертацию в области философских наук, в 1980 г. ей было присвоено ученое звание доцента, а с 1992 г. она полностью посвятила себя биоэтике. Идеи Поттера были глубоко созвучны с ее жизненной позицией, но как ученый пошла дальше и стала родоначальником в Беларуси нового направления – экологической этики.

Этот период ее жизни тесно связан с Международным экологическим университетом им. А. Д. Сахарова (ныне – МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ). Она воспитала бесчисленное количество учеников, работая с аспирантами и магистрантами, старалась передать им все лучшее, что имела. Татьяна Викторовна создала студенческий дискуссионный клуб ЭКО-ФИЛОСОФИЯ, ряд авторских курсов, включая такие как «Биомедицинская этика: современные парадигмы»; «Основы биомедицинской этики»;

«Биоэтика и экологическая этика». Студенты-естественники старались не пропускать, а стремились попасть на ее занятия повторно, поскольку педагог позволял обсуждать любые вопросы и был готов на равных вступить в спор с любым оппонентом. Как следствие, это самый плодотворный период ее жизни. Количество публикаций и монографий неисчислимо, а полную библиографию ее работ еще предстоит создать. По мнению читателей, наиболее популярная работа этого периода – учебное пособие «Экологическая этика и экология человека», «Педагогическая этика», «Биомедицинская этика» и «Этос науки» и др.

Как ученый Татьяна Викторовна постоянно организовывала и участвовала в выполнении серии проектов под эгидой ЮНЕСКО, а также в международных проектов с участием БРФФИ (Украины, Молдовы, Таджикистана, Узбекистана и др).

Она имела четкую гражданскую позицию, которая нашла свое отражение в инициации создания, а отом и в активной работе Национального Комитета по биоэтике при Министерстве здравоохранения Республики Беларусь.

Где бы ни работала Татьяна Викторовна, с кем бы не общалась, она всегда сохраняла верность своим принципам и идеалам, умела увлечь человека и убедить его следовать экологическим и биоэтическим принципам – от студентов до профессоров. Светлая память о ней надолго сохраниться в сердцах ее учеников, последователей и друзей. От нас ушел Учитель, Педагог, Друг и Женщина с большой буквы.

*Коллектив Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова БГУ.  
Редколлегия Журнала Белорусского государственного университета. ЭКОЛОГИЯ*

# СОДЕРЖАНИЕ

## СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

<i>Дзятковская Е. Н.</i> Идеи устойчивого развития в содержании естественнонаучных дисциплин.....	4
---	---

## ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Лазаренко М. В., Буга С. В.</i> Повреждаемость личинками кизиловой минирующей мухи ( <i>Phytomyza agromyzina</i> Meigen, 1830) свидин и деренов в городских зеленых насаждениях....	15
<i>Сушко Г. Г.</i> Методы сравнительного анализа видового состава насекомых различных местообитаний с использованием программной среды R.....	21
<i>Храмченкова О. М., Матвеенков М. В.</i> Фотозащитные, цитотоксические и фотомодифицирующие свойства неполярных фракций биомассы лишайников в отношении культуры кератиноцитов человека (HaCAT) .....	29
<i>Бондарук Р. С.</i> Влияние урбосреды на некоторые показатели растений туи западной ( <i>Thuja occidentalis</i> ) в условиях г. Минска.....	36

## РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Никитин А. Н., Мищенко Е. В., Шуранкова О. А.</i> Оценка эффективности искусственных нейронных сетей для количественной обработки спектра гамма-излучения <sup>137</sup> Cs .....	44
<i>Крюк Ю. Е., Мостовенко А. Л., Нилова Е. К., Кузьминчук В. А., Войтенко К. Ю.</i> Сравнительный анализ программных средств для оценки и прогнозирования показателей радиационной обстановки .....	55
<i>Жук И. В., Лукашевич Ж. А., Лисянович Т. В., Василевский Л. Л., Хакимов Д. А., Сосновский А. В.</i> Исследование уровней содержания радона в воздухе зданий на территории некоторых административных районов Витебской области.....	61

## МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Юркевич М. Ю., Альховик П. В., Царик А. А., Кохнюк М. А.</i> Получение культур альвеолоцитов I и II типа для медико-экологических исследований.....	67
--	----

## ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Рупасова Ж. А., Задаля В. С., Чижик О. В., Филипня В. Л., Павловский Н. Б.</i> Влияние способа вегетативного размножения на антиоксидантный комплекс плодов соргов <i>Vaccinium corymbosum</i> L.....	74
<i>Зальгина О. С., Чепрасова В. И.</i> Получение никельсодержащих пигментов из жидких отходов гальванического производства .....	84
<i>Захарко П. Н., Дубенок С. А.</i> Методика расчета водопользования для предприятий по производству молочных продуктов с учетом перерабатываемого сырья и производимой продукции .....	93

## ПАМЯТИ ВЫДАЮЩИХСЯ УЧЕНЫХ

Мишаткина Татьяна Викторовна (05.12.1941 – 10.06.2021).....	104
---	-----

## CONTENTS

### SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

*Dzyatkovskaya E. N.* Ideas of sustainable development in the content of science disciplines ..... 4

### THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

*Lazarenko M. V., Buga S. V.* Damage caused by larvae of mining fly (*Phytomyza agromyzina* Meigen, 1830) to dogwoods in urban green spaces ..... 15

*Sushko G. G.* Methods of the comparative analysis of the insect species composition in different habitats using the software environment R ..... 21

*Khramchankova V. M., Matveyenkau M. V.* Photoprotective, cytotoxic and photomodifying activity of lichen biomass non-polar fractions against human keratinocyte (HaCAT)..... 29

*Bondaruk R. S.* The impact of the urbanized environment on the example on some physiological indicators (*Thuja occidentalis*) of the city of Minsk ..... 36

### RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

*Nikitin A. N., Mischenko E. V., Shurankova O. A.* Evaluation of artificial neural networks effectiveness for unfolding gamma-spectrum of <sup>137</sup>Cs..... 44

*Kruk Yu. E., Mostovenko A. L., Nilova E. C., Kuzminchuk V. A., Voitenko K. Yu.* Comparative analysis of softwares for assessment and prediction of radiation situation indicators... 55

*Zhuk I. V., Lukashevich J. A., Lisyantovich T. V., Vasileuski L. L., Hakimov D. A., Sosnovskiy A. V.* Study of radon content in the air of premises on the territory of some administrative districts in the Vitebsk region..... 61

### MEDICAL ECOLOGY

*Yurkevich M. Yu., Alchovik P. V., Tsarik A. A., Kokhniuk M. A.* Cultures of alveolocytes I and II type for medical and ecological research ..... 67

### INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

*Rupasova Zh. A., Zadalya V. S., Chizhik O. V., Filipenia V. L., Pavlovsky N. B.* Vegetative propagation method influence on the antioxidant complex of *Vaccinium corymbosum* L..... 74

*Zalyhina V. S., Cheprasova V. I.* Obtaining nickel-containing pigments from liquid waste galvanic production ..... 84

*Zakharko P. N., Dubianok S. A.* Methods for calculating water use for dairy products production enterprises, taking into account the processed raw materials and types of produced products..... 93

### IN MEMORY OF OUTSTANDING SCIENTISTS

Mishatkina Tatyana Viktorovna (05.12.1941 – 10.06.2021)..... 104

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

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

**Журнал Белорусского  
государственного университета. Экология.  
№ 2. 2021**

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 25.06.2021.  
Тираж 100 экз. **Заказ .**

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

© БГУ, 2021

**Journal  
of the Belarusian State University. Ecology.  
No. 2. 2021**

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 25.06.2021.  
Edition 100 copies. **Order number .**

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, 2021