



БЕЛОРУССКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

ЖУРНАЛ  
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

# ЭКОЛОГИЯ

---

JOURNAL  
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

# ECOLOGY

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

---

# 1

# 2024

---

МИНСК  
БГУ

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

## EDITORIAL BOARD

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

---

---

# ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

---

## THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

---

---

УДК 502:628.4.047

### ЗНАЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ГРУПП МИКРООРГАНИЗМОВ В ИЗМЕНЕНИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ФОРМ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Е. А. ТАНКЕВИЧ<sup>1)</sup>, А. Н. НИКИТИН<sup>2)</sup>, И. И. КОНЦЕВАЯ<sup>3)</sup>, Ю. К. СИМОНЧИК<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь

<sup>3)</sup>Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины,  
ул. Советская, 104, 246019, г. Гомель, Беларусь

---

#### Образец цитирования:

Танкевич ЕА, Никитин АН, Концевая ИИ, Симончик ЮК. Значение основных физиологических групп микроорганизмов в изменении физико-химических форм техногенных радионуклидов в дерново-подзолистой почве зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;1:4–11. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-4-11>

#### For citation:

Tankevich EA, Nikitin AN, Kantsavaya II, Simonchyk YuK. The importance of the main physiological groups of microorganisms in the change of physico-chemical forms of technogenic radionuclides in the sod-podzolic soil of the exclusion zone of the Chernobyl NPP. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;1:4–11. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-4-11>

---

#### Авторы:

**Елена Александровна Танкевич** – младший научный сотрудник; аспирант лаборатории радиоэкологии.  
**Александр Николаевич Никитин** – кандидат сельскохозяйственных наук; заместитель директора по научной работе.  
**Ирина Ильинична Концевая** – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии биологического факультета.  
**Юлия Константиновна Симончик** – младший научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.

#### Authors:

**Elena A. Tankevich**, junior researcher; postgraduate student at the laboratory of radioecology.  
[elena.karpova1991@mail.ru](mailto:elena.karpova1991@mail.ru)  
**Aleksander N. Nikitin**, PhD (agriculture); deputy director for research.  
[nikitinale@gmail.com](mailto:nikitinale@gmail.com)  
**Irina I. Kantsavaya**, PhD (biology); associate professor at the department of biology, faculty of biology.  
[ikantsavaya@mail.ru](mailto:ikantsavaya@mail.ru)  
**Yuliya K. Simonchyk**, junior researcher at the laboratory of radioecology.  
[simonagomel@gmail.com](mailto:simonagomel@gmail.com)

Основными источниками радиоактивного загрязнения почвенно-растительного покрова являются глобальные радиоактивные выпадения из атмосферы долгоживущих радионуклидов после ядерных испытаний, а также выбросы техногенных радионуклидов, связанные с работой промышленных предприятий, аварий на АЭС. Микрофлора играет важную роль в преобразовании физико-химического состояния радионуклидов в почве. В зависимости от типа почвы и населяющего его микробоценоза, эти процессы могут как ускоряться, так и тормозиться. Исследование данной проблемы требует комплексного подхода с организацией долгосрочного мониторинга. Изучалось влияние почвенных микроорганизмов различных физиологических групп на изменение физико-химических форм техногенных радионуклидов дерново-подзолистой супесчаной почвы зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. Установлено, что наибольшему снижению удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой форме в дерново-подзолистой супесчаной почве способствуют такие группы микроорганизмов, как спорообразующие аммонификаторы – на 21,7 % и микробиологический препарат EM-1 – на 52,1 % по сравнению с контрольным образцом. Аммонифицирующие протеолитические микроорганизмы снижают удельную активность радионуклида в ионообменной форме на 12,5 %. В варианте опыта с применением удобрения EM-1 наблюдалось увеличение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в ионообменной форме на 16,9 %.

**Ключевые слова:** почвенные ассоциации микроорганизмов; радиоактивное загрязнение; зона отчуждения Чернобыльской АЭС; биологическая доступность техногенных радионуклидов;  $^{137}\text{Cs}$ .

**Благодарность.** Исследования проводились в рамках гранта для выполнения научно-исследовательских работ среди докторантов, аспирантов и соискателей Национальной академии наук Беларуси «Значение основных физиологических групп почвенных микроорганизмов в изменении биологической доступности техногенных радионуклидов».

## THE IMPORTANCE OF THE MAIN PHYSIOLOGICAL GROUPS OF MICROORGANISMS IN THE CHANGE OF PHYSICO-CHEMICAL FORMS OF TECHNOGENIC RADIONUCLIDES IN THE SOD-PODZOLIC SOIL OF THE EXCLUSION ZONE OF THE CHERNOBYL NPP

E. A. TANKEVICH<sup>a</sup>, A. N. NIKITIN<sup>b</sup>, I. I. KANTSAVAYA<sup>c</sup>, Yu. K. SIMONCHYK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus,  
4 Fiadzyuninskaya Street, Gomel 246007, Belarus*

<sup>b</sup>*Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus,  
2 Kuprevicha Street, Minsk 220084, Belarus*

<sup>c</sup>*Francyisk Skorina Gomel State University,  
104 Saveckaya Street, Gomel 246019, Belarus*

*Corresponding author: E. A. Tankevich (elena.karpova1991@mail.ru)*

The main sources of radioactive contamination of the soil and vegetation cover are global radioactive fallout from the atmosphere of long-lived radionuclides after nuclear tests, as well as emissions of man-made radionuclides associated with the work of industrial enterprises, accidents at nuclear power plants. Microflora plays an important role in the transformation of the physicochemical state of radionuclides in the soil. Depending on the type of soil and the microbial community inhabiting it, these processes can both accelerate and slow down. The study of this problem requires an integrated approach, with the organization of long-term monitoring. In this work, the influence of soil microorganisms of various physiological groups on the change of physicochemical forms of technogenic radionuclides of sod-podzolic sandy loam soil of the exclusion zone of the Chernobyl NPP was investigated. It was found that the greatest decrease in the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in water-soluble form in sod-podzolic sandy loam soil is promoted by such groups of microorganisms as spore-forming ammonifiers – by 21,7 % and microbiological preparation EM-1 – by 52,1 % compared with the control sample. Ammonifying proteolytic microorganisms reduce the specific activity of the radionuclide in ion-exchange form by 12,5 %. In the variant of the experiment using EM-1 fertilizer, an increase in the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in ion-exchange form was observed by 16,9 %.

**Keywords:** associations of soil microorganisms; radioactive contamination; exclusion zone of Chernobyl NPP; bioavailability of technogenic radionuclides;  $^{137}\text{Cs}$ .

**Acknowledgments.** The research was carried out within the framework of a grant to carry out research work among doctoral students, graduate students and applicants of the National Academy of Sciences of Belarus «The importance of the main physiological groups of soil microorganisms in changing the bioavailability of technogenic radionuclides».

### Введение

В настоящее время почвы испытывают разнообразное антропогенное воздействие, которое может нарушать нормальное протекание почвенных процессов, а значит, процессов круговорота веществ в биосфере.

Чувствительность и высокая индикационная способность микроорганизмов позволяют избрать их в качестве инструмента мониторинга антропогенных изменений биосферы [1].

Синтез основной массы органического вещества осуществляется главным образом растениями. Основной деятельностью почвенных микроорганизмов является минерализация органического вещества. Почвенные микроорганизмы выполняют системообразующие функции в таких процессах, как почвообразование, разложение почвенного органического вещества, стимуляция роста и обеспечение защиты растений от патогенной микрофлоры [2].

Почвенный микробиом является непосредственным источником формирования микрофлоры, которая определяет питание растений, их устойчивость к патогенам и абиотическим стрессам. Распространение микроорганизмов в природе зависит от многих условий, среди которых наиболее важными являются наличие питательных веществ, температура, влажность, благоприятная реакция субстрата.

И количественно, и качественно микрофлора почвы подвержена резким колебаниям в зависимости от физических и химических свойств почвы, ее положения в рельефе, освещения, влагоемкости, времени года и от целого ряда метеорологических и климатических факторов [3]. Обладая высокой химической активностью, микроорганизмы представляют действительно важнейшую геологическую силу, они принимая участие в процессах деструкции и минерализации органического вещества как природного (разложение целлюлозы), так и антропогенного происхождения [4; 5]. Чернобыльская радиационная катастрофа стала причиной загрязнения больших площадей почвенного покрова техногенными радионуклидами. По сей день значительное внимание привлекают основные загрязнители: цезий-137 и стронций-90. Изучение данных радионуклидов особенно актуально для территорий, пострадавших от аварии на ЧАЭС. Цезий-137 является радиоактивным изотопом цезия, возникающего при обычных продуктах деления урана-235 и других изотопов в ядерных реакторах и при использовании ядерного оружия. Он является одним из самых проблематичных изотопов из продуктов деления, поскольку способен легко перемещаться и распространяться в природе из-за высокой растворимости своих солей в воде [6].

Почвенные микроорганизмы являются источниками большого разнообразия физико-химических и биологических механизмов, осуществляющих превращения между растворимыми и нерастворимыми фазами радионуклидов.

Цель исследования – изучение влияния основных физиологических групп почвенных микроорганизмов на изменение физико-химических форм техногенных радионуклидов в дерново-подзолистой супесчаной почве зоны отчуждения Чернобыльской АЭС.

## Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись основные физиологические группы почвенных микроорганизмов, оказывающие существенное влияние на биологическую доступность техногенных радионуклидов дерново-подзолистой супесчаной почвы с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

Отбор проб дерново-подзолистой супесчаной почвы проводили в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС в частном подворье бывшего населенного пункта Борщевка (Гомельская обл., Беларусь, Полесский государственный радиационный экологический заповедник). Почва предварительно очищалась от надземных частей растений и отбиралась на глубину 10–15 см.

Для модельного эксперимента по изучению влияния основных физиологических групп почвенных микроорганизмов почва перед закладкой опыта была простерилизована (температура – 127 °С, давление – 1,5 атм., продолжительность – 45 мин). Почвой заполнялись пластиковые емкости (50 г сухой почвы на сосуд).

Для оценки влияния основных физиологических групп почвенных микроорганизмов на изменение биологической доступности техногенных радионуклидов дерново-подзолистой супесчаной почвы в модельном опыте использовали 9 групп почвенных микроорганизмов, выделенных в результате посевов на селективных агаризованных питательных средах, предназначенных для культивирования агрономически ценных групп микроорганизмов:

- 1) аммонифицирующие протеолитические бактерии (1);
- 2) общий комплекс культивируемых бактерий (2);
- 3) амилитические (3);
- 4) олигонитрофильные микроорганизмы (4);
- 5) фосфатмобилизующие микроорганизмы (6);
- 6) спорообразующие аммонифакторы (7);
- 7) автохтонные олиготрофы (10);
- 8) целлюлозоразрушающие аэробные (11а);
- 9) олигокарбофильные микроорганизмы (14).

Также дополнительно исследовали влияние микробиологического удобрения EM-1. Оно разработано профессором Тэруо Хига (University of the Ryukyus, Япония). В его состав входят три основные группы микроорганизмов: молочнокислые бактерии (*Lactobacillus plantarum*, *L. casei*, *Streptococcus lactis*), фотосинтезирующие бактерии (*Rhodospseudomonas palustris* и *Rhodobacter sphaeroides*), дрожжи (*Saccharomyces cerevisiae* и *Candida utilis*). Кроме того, в небольших количествах препарат включает актиномицеты (*Streptomyces albus* и *S. griseus*) и ферментирующие грибы (*Aspergillus oryzae*, *Mucor hiemalis*).

Каждый из вариантов опыта выполняли в пятикратной повторности. Суспензии почвенных микроорганизмов готовили на основе мясо-пептонного бульона (МПБ). Для этого в МПБ вносили из чашек Петри стерильной микробиологической петлей инокулянт, представляющий одну из выделенных групп почвенных микроорганизмов, тем самым были получены 9 опытных суспензий. Мутность этих жидких сред доводили до стандарта ВВЛ (стандарта мутности № 0.5, по МакФарланду) – при длине волны 625 нм оптическая плотность суспензий составляла 0,08–0,10. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре ПЭ-5300 ВИ.

В качестве раствора сравнения использовали мясо-пептонный бульон. Полученные бактериальные культуры помещали в термостат и инкубировали при температуре 37,1 °С в течение суток до появления визуальной мутности.

В каждую стерильную пластиковую емкость, заполненную 50 г сухой почвы, при помощи стерильного цилиндра вносили по 15 мл готовой суспензии соответствующей группы микроорганизмов, а также дозатором добавляли 1 мл хлорида стабильного цезия ( $\text{CsCl}$ ). В контрольные образцы (к) вносили по 15 мл мясо-пептонного бульона без добавления микроорганизмов.

Пластиковые пробирки закрывали крышками. Для дополнительной аэрации в крышках были сделаны небольшие отверстия, которые на время эксперимента были закрыты стерильной гигроскопической ватой (рис. 1). Через 15 дней после закладки эксперимента в каждую емкость вносили по 5 мл стерилизованной воды, чтобы не допустить пересыхания почвенных образцов.



Рис. 1. Внешний вид наполненных дерново-подзолистой супесчаной почвой емкостей в начале эксперимента

Fig. 1. The appearance of containers filled with sod-podzolic sandy loam soil at the beginning of the experiment

Продолжительность экспозиции дерново-подзолистой почвы с микроорганизмами составила 1 календарный месяц.

Для изучения влияния каждой из физиологических групп почвенных микроорганизмов на изменение биодоступных форм  $^{137}\text{Cs}$  определяли содержание водорастворимой и обменной форм радионуклида методом последовательной экстракции [7; 8].

Последовательная экстракция включала следующие этапы:

1. Водорастворимую форму выделяли посредством экстракции в дистиллированной воде. Образец почвы 20 г помещали в 200 мл дистиллированной воды. Суспензию взбалтывали при комнатной температуре на протяжении 24 ч.

2. Экстракт отделяли от почвы фильтрованием. Почву промывали на фильтровальной бумаге 200 мл дистиллированной воды. Жидкую фазу помещали в сосуд емкостью 100 мл для измерения на  $\gamma$ -спектрометре.

3. Ионообменную форму выделяли посредством экстракции в растворе ацетата аммония. Твердую фазу с предыдущего шага помещали в 200 мл 1 М раствора ацетата аммония с рН, доведенной до 7,0.

4. Суспензию взбалтывали при комнатной температуре на протяжении 24 ч.

5. Экстракт отделяли от почвы фильтрованием. Почву промывали 200 мл дистиллированной воды. Жидкую фазу помещали в сосуд емкостью 100 мл для измерения на  $\gamma$ -спектрометре.

Измерения на гамма-спектрометрическом комплексе *CANBERRA Packard* с коаксиальным полупроводниковым детектором *Ge(Li)* расширенного энергетического диапазона проводили в соответствии с принятыми методическими рекомендациями<sup>1</sup>.

Относительная ошибка измерения удельной активности <sup>137</sup>Cs в пробах составляла от 5 до 10 % в зависимости от активности образца.

Микробиологическую индикацию почвы выполняли согласно общепринятым в почвенной микробиологии методам [9; 10]. Агрохимический анализ стерильного почвенного образца выполняли согласно ГОСТ<sup>2–7</sup>.

### Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследований выявлено, что удельная активность исследуемой дерново-подзолистой супесчаной почвы составила  $12868 \pm 775$  Бк/кг.

Агрохимические показатели модельной дерново-подзолистой супесчаной почвы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Агрохимические показатели модельной дерново-подзолистой супесчаной почвы

Table 1

Agrochemical indicators of model sod-podzolic sandy loam soil

Агрохимические показатели почвы	Единицы измерения
pH (в KCl), ед.	6,5
Ca (обм), ммоль/100 г	12,13
Ca (обм), млн <sup>-1</sup> (мг/кг)	2430
Mg (обм, подв.), ммоль/100 г	0,8
Mg (обм, подв.), млн <sup>-1</sup> (мг/кг)	91,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (подв), млн <sup>-1</sup> (мг/кг)	3017
Органическое вещество (гумус), %	3,6
S, сумма поглощенных оснований, ммоль / 100 г	41,8
Hг, гидролитическая кислотность, ммоль / 100 г	0,99
T, емкость поглощения, ммоль / 100 г	42,79
V, степень насыщенности почв основаниями, %	97,7
K <sub>2</sub> O (обм.), млн <sup>-1</sup> (мг/кг)	708

Уровень pH близок к нейтральному – 6,5. В модельной почве наблюдалось очень высокое содержание обменного кальция (2430 мг/кг), низкое содержание обменного магния 91,2 мг/кг.

Содержание подвижного фосфора (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) в дерново-подзолистой почве соответствует очень высокому значению – 3017 мг/кг.

<sup>1</sup>МВИ. МН 3421-2010: МВИ объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами: утв. БелГИМ 28.05.10. Минск: БелГИМ, 2010. 35 с.

<sup>2</sup>ГОСТ 26483-85. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. Введ. 1986-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1985. 6 с.

<sup>3</sup>ГОСТ 26212-2021. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. Введ. 2022-08-01. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.

<sup>4</sup>ГОСТ 27821-2020. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена. Введ. 2022-01-01. Москва: Стандартинформ, 2020. 9 с.

<sup>5</sup>ГОСТ 26487-85. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. Введ. 1986-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1985. 14 с.

<sup>6</sup>ГОСТ 26207-91. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Введ. 1993-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1992. 7 с.

<sup>7</sup>ГОСТ 26213-2021. Методы определения органического вещества. Взамен ГОСТ 26213-91; введ. 2022-08-01. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.

Обеспеченность дерново-подзолистой почвы обменным калием ( $K_2O$ ) соответствует очень высоким показателям – 708 мг/кг.

Содержание органического вещества (гумуса) составляет 3,6 %, что соответствует очень высокому показателю. Сумма поглощенных оснований (S) в дерново-подзолистой почве имеет значение 41,8 ммоль / 100 г и является очень высоким показателем.

В табл. 2 представлены данные по оценке влияния почвенных микроорганизмов различных физиологических групп на содержание водорастворимой и ионообменной формы  $^{137}Cs$  в дерново-подзолистой супесчаной почве.

Таблица 2

**Оценка влияния почвенных микроорганизмов различных физиологических групп на содержание водорастворимой и ионообменной формы  $^{137}Cs$  в дерново-подзолистой супесчаной почве**

Table 2

**Assessment of the influence of soil microorganisms of various physiological groups on the content of water-soluble and ion-exchange form  $^{137}Cs$  in sod-podzolic sandy loam soil**

Группа микроорганизмов (вариант опыта)	Водорастворимая форма $^{137}Cs$ , Бк/кг	Ионообменная форма $^{137}Cs$ , Бк/кг
Контроль (К)	138,9 ± 27,7	1058,2 ± 130,2
Аммонифицирующие (1)	141,9 ± 20,7	926,0 ± 129,4*
Общий комплекс культивируемых микроорганизмов (2)	122,6 ± 34,4	1022,3 ± 151,5
Амилитические (3)	90,8 ± 73,9	1038,9 ± 184,3
Олигонитрофильные (4)	143,3 ± 58,8	1141,9 ± 134,3
Фосфатмобилизующие (6)	113,9 ± 28,6	1095,4 ± 83,5
Спорообразующие аммонификаторы (7)	108,8 ± 17,6*	1109,8 ± 111,9
Автохтонные олиготрофы (10)	176,1 ± 112,8	1082,9 ± 133,7
Целлюлозоразрушающие аэробные (11а)	129,0 ± 78,6	1133,1 ± 228,6
ЕМ-1 (ЕМ)	66,6 ± 38,6**	1236,8 ± 123,7*
Олигокарбофильные (14)	139,4 ± 54,7	1166,7 ± 139,7

Примечание. Различия достоверны по отношению к контролю: \* – ( $p < 0,05$ ), \*\* – ( $p < 0,01$ ).

В данной почве 1,1 % запаса радионуклида находится в водорастворимой форме, в ионообменной форме – 8,2 % его запаса. Это свидетельствует о нахождении значительного запаса радионуклида в биологически доступных формах и достаточно высоком потенциале снижения его накопления растениями в случае его понижения.

Результаты эксперимента показывают, что наибольшему снижению удельной активности  $^{137}Cs$  в водорастворимой форме способствует комплекс микроорганизмов, входящих в состав микробиологического препарата ЕМ-1. Их внесение в почву позволяет практически вдвое уменьшить запас радиоактивного изотопа цезия в водорастворимой форме.

Активность амилитических микроорганизмов позволила снизить запас  $^{137}Cs$  в водорастворимой форме на 34,7 %. Однако по сравнению с контрольным вариантом опыта различия не оказались достоверными.

Амилитические бактерии обладают способностью к биологической азотфиксации, то есть связыванию азота атмосферы и переводу его в азотсодержащие соединения. Азотфиксирующей способностью также обладают пурпурные бактерии *Rhodospseudomonas palustris* и *Rhodobacter sphaeroides*, входящие в состав ЕМ-1.

Согласно литературным данным, применение бактериальных азотфиксирующих препаратов на землях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, в дозах, необходимых для обеспечения нормального роста растений, ведет к появлению в почве большого количества активных катионных групп ( $NH_4^+$ ). Аммоний вытесняет ионы  $Cs^+$  из почвенного поглощающего комплекса и участков специфической сорбции, что повышает биологическую доступность радионуклида [11]. Однако в случае с внесением спорообразующих аммонификаторов наблюдается обратный эффект – происходит значимое снижение доли  $^{137}Cs$  в водорастворимой форме – на 21,7 % по сравнению с контрольным вариантом опыта. Еще более сильное снижение

содержания водорастворимой формы радионуклида вызывает добавление в почву консорциума микроорганизмов, входящих в состав препарата ЕМ-1.

В используемой в эксперименте почве имеется достаточно высокое содержание органического углерода. В этих благоприятных условиях аммонификация протекает довольно интенсивно, но высвобождается мало аммиака, поскольку активно развиваются популяции микроорганизмов, расходуя аммиачный азот для формирования клеток. Азот тем самым переходит в органическую форму, то есть иммобилизуется и не выделяется в почву. Внесение в почву автохтонных олиготрофов несколько увеличило содержание  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой форме (на 26,8 %). Однако различия с контролем не являются статистически значимыми.

Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в ионообменной форме в дерново-подзолистой супесчаной почве является более инертным показателем по сравнению с водорастворимой.

Результаты эксперимента показали, что аммонифицирующие протеолитические микроорганизмы снижают удельную активность радионуклида в ионообменной форме на 12,5 %. Аммонифицирующие бактерии при помощи ферментов, выделяемых ими в почву, разлагают сложные белковые молекулы на более простые соединения. Эти соединения осмотическим путем проникают в клетки микроорганизмов и под действием внутриклеточных ферментов подвергаются дезаминированию, при котором высвобождается аммиак. Но в условиях, благоприятствующих активному развитию микроорганизмов, аммоний активно поглощается ими из почвенной среды. В результате чего содержание аммония, антагониста цезия в сорбированных формах, не возрастает, но даже может происходить биосорбция  $\text{Cs}^+$  наряду с  $\text{K}^+$  и рядом других элементов. Данные обстоятельства приводят к снижению содержания радиоактивного изотопа цезия в биодоступных формах. В варианте опыта с применением удобрения ЕМ-1 наблюдалось увеличение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в ионообменной форме на 16,9 % по сравнению с контролем, что должно несколько повысить биологическую доступность радионуклида.

Группа олигокарбофильных микроорганизмов проявила тенденцию к увеличению удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в ионообменной форме на 10,3 % по сравнению с контрольным образцом. Олигокарбофильные бактерии способны к росту при минимальных концентрациях органического вещества, участвуя в завершении процесса деструкции. Данная подгруппа олиготрофов обладает высокой окислительно-восстановительной ферментативной активностью, поэтому по биохимической принадлежности наиболее приближена к автохтонной части микробоценоза почвы. В условиях минимального количества или полного отсутствия доступного углерода в почвенном растворе олигокарбофилы начинают трансформировать свободные и новообразованные фракции гумуса, участвовать в преобразовании специфического органического вещества почвы и изменять ее гумусовый режим.

На рис. 2 показано влияние основных физиологических групп почвенных микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный)  $^{137}\text{Cs}$  в дерново-подзолистой супесчаной почве.

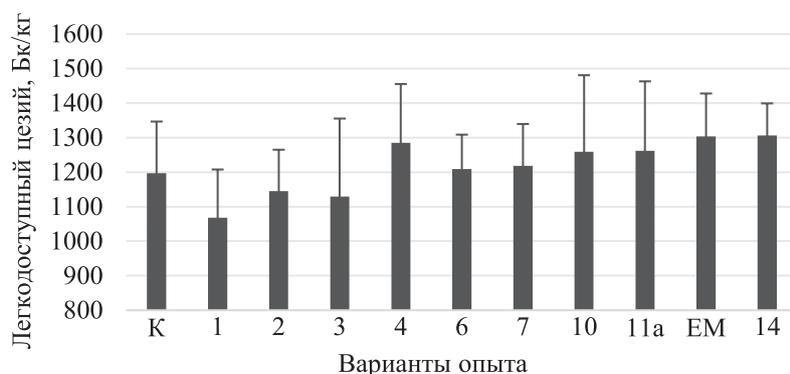


Рис. 2. Содержание легкодоступного  $^{137}\text{Cs}$  в модельной дерново-подзолистой супесчаной почве

Fig. 2. The content of readily available  $^{137}\text{Cs}$  in the model sod-podzolic sandy loam soil

Олигокарбофильные микроорганизмы повысили данный показатель на 9,1 %, микробиологический препарат ЕМ-1 – на 8,9 %, олигонитрофильные – на 7,3, целлюлозоразрушающие аэробные – на 5,4, автохтонные олиготрофы – на 5,2, спорообразующие аммонификаторы – на 1,8 и фосфатмобилизирующие – на 1,1 %.

Снижению же данного показателя способствовали аммонифицирующие протеолитические микроорганизмы – на 10,8 %, амилотические микроорганизмы – на 5,6 и общий комплекс культивируемых микроорганизмов – на 4,4 %. Однако достоверных различий по сравнению с контрольным вариантом опыта не наблюдалось.

## Заключение

Изучено влияние основных физиологических групп почвенных микроорганизмов на изменение физико-химических форм техногенных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  дерново-подзолистой супесчаной почвы зоны отчуждения Чернобыльской АЭС методом последовательной экстракции.

Установлено, что внесение в стерильную почву спорообразующих аммонификаторов снижает содержание  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой форме на 21,7 %, консорциум микроорганизмов из удобрения ЕМ-1 в тех же условиях понижает содержание радионуклида на 52,1 %. Другие исследованные физиологические группы микроорганизмов не оказали существенного влияния на концентрацию  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой форме при 1-месячной экспозиции.

Аммонифицирующие протеолитические микроорганизмы при внесении в стерильную дерново-подзолистую супесчаную почву снижают удельную активность радионуклида в ионообменной форме на 12,5 %. В варианте опыта с применением удобрения ЕМ-1 наблюдалось увеличение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в ионообменной форме на 16,9 %. Другие исследованные физиологические группы микроорганизмов не оказали существенного влияния на концентрацию радионуклида в ионообменной форме.

## Библиографические ссылки

1. Никитина ЗИ. *Микробиологический мониторинг наземных экосистем*. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение; 1991. 222 с.
2. Condron L, Stark C, O'Callaghan M. The Role of Microbial Communities in the Formation and Decomposition of Soil Organic Matter. In: *Soil Microbiology and Sustainable Crop Production*. New York: Springer Science + Business Media B. V.; 2010. p. 81–117.
3. Кашнер Д. *Жизнь микробов в экстремальных условиях*. Москва: Издательство «Мир»; 1981. 521 с.
4. Звягинцев ДГ. *Биология почв*. Москва: Издательство МГУ; 2005. 445 с.
5. Ajit Varma, Ralf Oelmuller *Advanced Techniques in Soil Microbiology*. Berlin: Springer; 2007. 427 p.
6. Nimis PL. Radiocesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobotanica*. 1996;15:3–49.
7. Ure AM, Davidson CM. *Chemical speciation in the environment*. Second edition. Wiley: [publisher unknown]; 2002. 452 p.
8. Hou X. Iodine-129 and caesium-137 in chernobyl contaminated soil and their chemical fractionation. *Science of The Total Environment*. 2003;308(1–3):97–109.
9. Возняковская ЮМ. *Основные микробиологические и биохимические методы исследования почв*. Ленинград: ВНИИСХМ; 1987. 47 с.
10. Теппер ЕЗ. *Практикум по микробиологии*. Москва: Агропромиздат; 1987. 239 с.
11. Черненко ИВ. Бактериальные азотфиксирующие препараты на почвах, подвергшихся радиоактивному загрязнению. *Агропанорама*. 1997;4:20–21.

## References

1. Nikitina ZI. *Mikrobiologicheskii monitoring nazemnykh ekosistem* [Microbiological monitoring of terrestrial ecosystems]. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoje otdelenie; 1991. 222 p. Russian.
2. Condron L, Stark C, O'Callaghan M. The Role of Microbial Communities in the Formation and Decomposition of Soil Organic Matter. In: *Soil Microbiology and Sustainable Crop Production*. New York: Springer Science + Business Media B. V.; 2010. p. 81–117.
3. Kashner D. *Zhizn' mikrobov v ekstremal'nykh usloviyakh* [The life of microbes in extreme conditions]. Moscow: Publishing house «Mir»; 1981. 521 p. Russian.
4. Zvyagintsev DG. *Biologiya pochv* [Soil Biology]. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 2005. 445 p. Russian.
5. Ajit Varma, Ralf Oelmuller *Advanced Techniques in Soil Microbiology*. Berlin: Springer; 2007. 427 p.
6. Nimis PL. Radiocesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobotanica*. 1996;15:3–49.
7. Ure AM, Davidson CM. *Chemical speciation in the environment*. Second edition. Wiley: [publisher unknown]; 2002. 452 p.
8. Hou X. Iodine-129 and caesium-137 in chernobyl contaminated soil and their chemical fractionation. *Science of The Total Environment*. 2003;308(1–3):97–109.
9. Voznyakovskaya YuM. *Osnovnye mikrobiologicheskie i biokhimicheskie metody issledovaniya pochv* [Basic microbiological and biochemical methods of soil research]. Leningrad: VNIISHM; 1987. 47 p. Russian.
10. Tepper EZ. *Praktikum po mikrobiologii* [Microbiology Workshop]. Moscow: Agropromizdat; 1987. 239 p. Russian.
11. Chernenok IV. *Bakterial'nye azotfiksiruyushchie preparaty na pochvakh, podvergshikhsya radioaktivnomu zagryazneniyu* [Bacterial nitrogen-fixing preparations on soils exposed to radioactive contamination]. *Agropanorama*. 1997;4:20–21. Russian.

Статья поступила в редакцию 07.11.2023.  
Received by editorial board 07.11.2023.

УДК 579.253.44

## ОЦЕНКА ВСТРЕЧАЕМОСТИ АУКСОТРОФНЫХ ВАРИАНТОВ НЕКОТОРЫХ САНИТАРНО-ПОКАЗАТЕЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В ПОЧВАХ ТЕРРИТОРИЙ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

С. В. МАЛЬЦЕВА<sup>1)</sup>, А. Г. СЫСА<sup>1)</sup>, И. Э. БУЧЕНКОВ<sup>1)</sup>, Е. Р. ГРИЦКЕВИЧ<sup>1)</sup>, В. С. БИРГ<sup>2)</sup>, А. Х. Д. АХМЕД<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>Белорусский государственный педагогический университет им. Максима Танка,  
ул. Советская, 18, 220030, г. Минск, Беларусь

Длительное нахождение условно-патогенных микроорганизмов в условиях ионизирующего излучения может привести к увеличению частоты встречаемости ауксотрофных вариантов, трансформации некоторых физиолого-биохимических свойств, а также к изменению питательных потребностей в результате нарушения синтеза и функционирования специфических ферментов. Объектами для исследований служили чистые культуры бактерий группы кишечной палочки (БГКП), а также некоторые представители рода *Bacillus*, выделенные из проб почв, находящихся под длительным воздействием ионизирующего излучения. Предметом исследования является оценка встречаемости ауксотрофных вариантов условно-патогенных микроорганизмов. Установлено, что ауксотрофные варианты микроорганизмов встречаются во всех обследованных почвах. Отмечена зависимость встречаемости ауксотрофов от уровня радиационного загрязнения почв. В почвах, испытывающих интенсивную радионуклидную нагрузку, большинство изолятов обладали множественной ауксотрофностью. При культивировании выделенных изолятов бактерий обнаружены ауксотрофные варианты практически по всем проанализированным аминокислотам. Показано, что выделенные варианты БГКП и рода *Bacillus* в целом различаются по потребностям в отдельных аминокислотах в зависимости от территории, с которой были отобраны образцы почв для анализа. Данное различие в большей мере обусловлено дифференцированными показателями ауксотрофности бактерии *B. mycoides*. Цель исследования – провести оценку встречаемости ауксотрофных вариантов условно-патогенных микроорганизмов, находившихся в условиях длительного воздействия ионизирующего излучения.

### Образец цитирования:

Мальцева СВ, Сыса АГ, Бученков ИЭ, Грицкевич ЕР, Бирг ВС, Ахмед АХД. Оценка встречаемости ауксотрофных вариантов некоторых санитарно-показательных микроорганизмов в почвах территорий радиоактивного загрязнения. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;1:12–18.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-12-18>

### For citation:

Maltseva SV, Sysa AG, Butchenkov IE, Gritskevitch ER, Birg VS, Ahmed AHD. Assessment of auxotrophic sanitary-indicative microorganisms occurrence in radiation-contaminated soils. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;1:12–18. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-12-18>

### Автор:

**Светлана Васильевна Мальцева** – магистрант, факультет экологической медицины.  
**Алексей Григорьевич Сыса** – кандидат химических наук, доцент; декан факультета экологической медицины.  
**Игорь Эдуардович Бученков** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; доцент кафедры общей биологии и генетики.  
**Евгений Ростиславович Грицкевич** – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры иммунологии.  
**Владимир Семенович Бирг** – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры биологии и методики преподавания биологии.  
**Ахмед Хайдер Дийя Ахмед** – аспирант, факультет экологической медицины.

### Author:

**Svetlana V. Maltseva**, master's degree student, faculty of environmental medicine.  
[sveta.malceva28@mail.ru](mailto:sveta.malceva28@mail.ru)  
**Aliaksei G. Sysa**, PhD (chemistry), docent; dean of environmental medicine.  
[aliaksei.sysa@iseu.by](mailto:aliaksei.sysa@iseu.by)  
**Igor E. Butchenkov**, PhD (agriculture), docent; associate professor at the department of general biology and genetics.  
[butchenkow@mail.ru](mailto:butchenkow@mail.ru)  
**Evgeniy R. Gritskevitch**, PhD (biology), docent; associate professor at the department of immunology.  
[gritskevitchev@mail.ru](mailto:gritskevitchev@mail.ru)  
**Vladimir S. Birg**, PhD (biology), docent; associate professor at the department of biology and methods of teaching biology.  
[vlad\\_b39@mail.ru](mailto:vlad_b39@mail.ru)  
**Ahmed H. D. Ahmed**, postgraduate student, faculty of environmental medicine.  
[haidar.alamer@gmail.com](mailto:haidar.alamer@gmail.com)

**Ключевые слова:** ауксотрофность; почвенная микрофлора; аминокислоты; ионизирующее излучение; микробиологическая оценка почв.

**Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках проекта «Изучение экологических особенностей функциональной активности почвенных микроорганизмов в условиях длительного воздействия ионизирующего излучения (на примере модельных территорий)» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг., регистрационный № 20211336.

## ASSESSMENT OF AUXOTROPHIC SANITARY-INDICATIVE MICROORGANISMS OCCURRENCE IN RADIATION-CONTAMINATED SOILS

S. V. MALTSEVA<sup>a</sup>, A. G. SYSA<sup>a</sup>, I. E. BUTCHENKOV<sup>a</sup>, E. R. GRITSKEVITCH<sup>a</sup>, V. S. BIRG<sup>a</sup>, A. H. D. AHMED<sup>a</sup>

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

<sup>a</sup>Belarusian State Pedagogical University after M. Tank,  
18 Saveckaja Street, 220030 Minsk, Belarus

Corresponding author: A. G. Sysa (aliaksei.sysa@iseu.by)

Long-term exposure of opportunistic microorganisms to ionizing radiation can lead to an increase in the frequency of occurrence of auxotrophic variants, changes in some physiological and biochemical properties, as well as changes in nutritional needs as a result of disruption of the synthesis and functioning of specific enzymes. The purpose of the study is to assess the occurrence of auxotrophic variants of opportunistic microorganisms exposed to long-term exposure to ionizing radiation. The objects for research were pure cultures of coliform bacteria (CB), as well as the genus *Bacillus*, isolated from soil samples under long-term exposure to ionizing radiation. The subject of the study is to assess the occurrence of auxotrophic variants of opportunistic microorganisms. It was established that auxotrophic variants of microorganisms are found in all examined soils. There was a dependence of occurrence of auxotrophs on the level of radiation contamination of soils. In soils experiencing intense radionuclide load, most isolates had multiple auxotrophy. When cultivating isolated bacterial isolates, auxotrophic variants were found for almost all analyzed amino acids. It was shown that the isolated variants of coliforms and the genus *Bacillus* generally differ in their requirements for individual amino acids depending on the territory from which soil samples were taken for analysis. Moreover, this difference is largely due to differentiated indicators of auxotrophy of *B. mycoides*.

**Key words:** auxotrophy; soil microflora; amino acids; microbiological assessment of soils.

**Acknowledgments.** This work was supported by Ministry of Education of the Republic of Belarus (project 10.3.03.04 SPSR «Natural resources and environment» subprogram 3 «Radiation and biological systems» for 2021–2025 (No. SR 20211336).

### Введение

Изучение функционирования микробных комплексов необходимо для экологического мониторинга районов, подвергшихся комплексному антропогенному загрязнению. Принципиально важно, что уже на самых ранних стадиях и при минимальных уровнях техногенных стрессоров микробиоценозы являются наиболее чувствительной и информативной диагностической компонентой биоты, быстро реагирующей на смену экологических условий изменением функциональной активности [1]. Структура комплексов почвенных микроорганизмов и закономерности их функционирования различаются в зависимости от характера антропогенного воздействия и экологических условий.

При использовании ядерных технологий в военных, медицинских целях, а также для энергетики выбросы радионуклидов в окружающую среду и их дальнейшая подвижность является предметом повышенного общественного внимания и широко изучается научной общественностью [2].

Радиационное загрязнение может приводить к значительным изменениям окружающей среды. Так, оно существенно изменяет физические, химические и биологические характеристики почв, нарушает экологические условия, влияющие на состав и распределение почвенных микробиологических сообществ.

До настоящего времени проведен ряд исследований состояния микробных комплексов (в основном микосообществ) в значительно загрязненных радиоактивными элементами регионах. Так, Степанов и др. [3] отмечают уменьшение количества штаммов бактерий родов *Aeromonas*, *Pseudomonas* и *Rhodococcus*, а также увеличение удельного веса микобактерий и грибов в почвах, загрязненных радионуклидом <sup>137</sup>Cs в дозе 5395,5 кБк. Авторы Durrell и Lora [4] обнаружили радиорезистентные штаммы микроорганизмов на ядерном полигоне Невада в США. Kieft, et al. [5] указывают, что вода является критическим

рост-лимитирующим фактором для микроорганизмов в Юкке Гора, штат Невада, США. Авторы Dighton, et al. [6] показали высокое разнообразие микросообществ вокруг радиоактивно загрязненных после аварии на Чернобыльской АЭС территорий. Авторы Dighton, et al. [4] и Wehrden, et al. [7] также отметили наличие физиологических и морфологических изменений грибов, большинство из которых представляют собой адаптационные изменения к радиационному воздействию.

Итак, не вызывает сомнения существование и большое биоразнообразие почвенных микроорганизмов, обитающих на радиоактивно загрязненных территориях. Однако популяционно-видовые, биохимические, молекулярно-генетические модификации биоразнообразия почвенных микроорганизмов в естественных условиях воздействия ионизирующего излучения требуют глубокого изучения.

Актуальность настоящего исследования обусловлена тем, что дифференциальная радиочувствительность почвенных микроорганизмов в условиях значительного техногенного повышения содержания радионуклидов в почве может приводить к трансформации видового разнообразия и, как следствие, к возможному нарушению нормального функционирования почвенной биоты в целом.

## Материалы и методы исследования

Материалом для исследования послужили чистые культуры БГКП и бактерии рода *Bacillus*, выделенные из почв, находившихся под длительным воздействием ионизирующего излучения, и почв, не подвергавшихся данному воздействию. Во всех случаях почвы относятся к дерново-подзолисто-му типу на моренных и лёссовидных суглинках. Отбор проб почв осуществлялся на модельных участках (25 м<sup>2</sup> каждый) на опушках смешанных лесов на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ППРЭЗ) и территории Березинского биосферного заповедника (ББЗ) – естественный фоновый уровень ионизирующего излучения. Отбор проб проводился с использованием метода выделения микроорганизмов по «конверту» (четыре точки по углам и одна в центре) в летний период (август).

Радиометрический анализ проб почвы для выявления наличия в пробах радионуклидов <sup>137</sup>Cs проводился согласно методике МВИ.МН 1181-2011 с использованием сцинтилляционного гамма-бета спектрометра МКС-АТ1315, время измерения составило 3 ч<sup>3</sup>.

Для обнаружения и количественного учета представителей семейства *Enterobacteriaceae*, а также рода *Bacillus* использовали культуральные, тинкториальные и физиолого-биохимические методы анализа [8; 9].

Ауксотрофные варианты тестовых культур идентифицировали по неспособности к росту на минимальной агаризованной среде. Минимальный агар [10] готовили из 300 мл 2%-го водяного агара, 100 мл солевого концентрата (NH<sub>4</sub>Cl – 20 г, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> – 4 г, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – 8 г, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> – 12 г, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> – 4 г, MgSO<sub>4</sub> × 7 H<sub>2</sub>O – 0,4 г, дистиллированная вода – 1000 мл) и 4 мл 20%-го раствора глюкозы.

Пищевые потребности объекта исследования определяли с использованием минимальной среды аналитического состава с различными комбинациями аминокислот. В работе использовали 10 аминокислот с концентрацией 2 мг/мл (метионин, тирозин, лизин, глицин, пролин, гистидин, серин, аргинин, лейцин, цистеин). Все культуры инкубировались 24 ч при температуре 32 °С для бактерий рода *Bacillus* и 37 °С для БГКП. Принадлежность к полиауксотрофной форме подтверждали по необходимости присутствия пяти и более факторов роста в питательной среде.

Численность микроорганизмов определяли методом подсчета общего микробного числа (ОМЧ) в пересчете на 1 г почвы [11].

Сравнение качественных признаков (выраженных в частотах) проводили с помощью точного критерия Фишера. Отличия считались статистически значимыми при  $p < 0,05$  [12].

Для факторного анализа смешанных (содержит как количественные, так и качественные переменные) данных в настоящей работе использована факторная модель *FAMD* [13] библиотеки *FactoMineR* в среде статистических вычислений *R* (GraphPad Software, Inc.) [14].

## Результаты исследования и их обсуждение

В работе выделены и идентифицированы чистые культуры санитарно-показательных микроорганизмов из проб почв, находящихся под длительным воздействием ионизирующего излучения, а также с естественным уровнем ионизирующего излучения и низким уровнем техногенного загрязнения.

Радиометрический анализ проб почвы из ББЗ не выявил активность по радионуклиду <sup>137</sup>Cs, в то же время для почв из ППРЭЗ показатель удельной активности составил  $1330,0 \pm 353,00$  Бк/кг. Следует отметить,

<sup>3</sup>МВИ.МН 1181-2011. Методика выполнения измерений объемной и удельной активности стронция-90, цезия-137 и калия-40 на гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315, объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов цезия-137 и калия-40 на гамма-спектрометре типа EL 1309 (МКГ-1309) в пищевых продуктах, питьевой воде, почве, сельскохозяйственном сырье и кормах, продукции лесного хозяйства и других объектах окружающей среды.

что удельная активность радионуклидов в пробах почв ББЗ соответствует фоновым уровням для данных территорий. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в исследуемых пробах почв ПГРЭЗ согласуются с данными о поверхностной плотности загрязнения модельных территорий  $^{137}\text{Cs}$  (Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия – Беларусь, 2009).

Численность микроорганизмов в пересчете на 1 г почвы указаны в табл. 1.

Таблица 1

**Показатели общего микробного числа микроорганизмов, выделенных из проб почв**

Table 1

**Indicators of the total microbial number of microorganisms isolated from soil samples**

Проба почвы	Среднее значение ОМЧ на 1 г почвы
Пробы почв ПГРЭЗ	$31,8 \cdot 10^6 \pm 2$
Пробы почв ББЗ	$23,4 \cdot 10^6 \pm 2$

Как следует из данных, представленных в табл. 1, общая численность микроорганизмов в пробах почв ПГРЭЗ была на 33,6 % выше по сравнению с ОМЧ ББЗ ( $23,4 \pm 2$  млн клеток).

В работе проведена оценка встречаемости ауксотрофных вариантов *БГКП*, *B. cereus*, *B. subtilis*, *B. thuringiensis* и *B. mycooides* в отобранных пробах почв. Ауксотрофные варианты микроорганизмов идентифицировали по неспособности к росту на минимальной агаризованной среде (табл. 2).

Таблица 2

**Показатели частоты встречаемости ауксотрофных вариантов исследованных микроорганизмов от общего количества исследуемых изолятов, %**

Table 2

**Indicators of the frequency of the studied microorganisms auxotrophic variants occurrence from the total number of studied isolates, %**

Место отбора проб почвы	Микроорганизм				
	<i>БГКП</i>	<i>B. cereus</i>	<i>B. subtilis</i>	<i>B. thuringiensis</i>	<i>B. mycooides</i>
Проба почв ПГРЭЗ	52*(50,25÷53,75)	21,5*(20÷23,13)	37,5*(33,25÷42)	40,5*(40÷41)	12*(11÷12,75)
Проба почв ББЗ	10 (8,5÷11,4)	15 (13,7÷15,5)	8 (7,5÷8,4)	13 (12,2÷13,8)	8 (7,25÷8,75)

\*Статистически значимые различия по сравнению с контролем ( $p \leq 0,001$  по двустороннему критерию Фишера).

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что ауксотрофные варианты выделены на всех точках отбора проб в количестве от 8 до 52 % от общего объема культур. Наименьшее количество ауксотрофов установлено для контрольной территории ББЗ (8–15 %) с низким уровнем радиационного и прочего техногенного загрязнения.

Из данных табл. 3, ауксотрофные варианты *B. cereus*, *B. subtilis*, *B. thuringiensis*, выделенные из образца почвы ББЗ, во всех пробах проявляли ауксотрофность по отношению к глутаминовой кислоте. Также высокая частота встречаемости ауксотрофных вариантов указанных микроорганизмов, выделенных из почв ПГРЭЗ и ББЗ, отмечается по отношению к лейцину, серину и метионину. Необходимо отметить, что метионин служит источником азота и серы для бактерий, тем самым играя важную роль в синтезе белков и других биомолекул, необходимых для обеспечения нормального роста бактерии [15]. Отметим, что метионин вовлечен в регуляцию генов, связанных с метаболизмом и другими физиологическими процессами [16].

Установлено, что варианты *B. thuringiensis*, выделенные из обоих образцов почвы, во всех пробах проявляли ауксотрофность по отношению к пролину. Необходимо выделить, что пролин – аминокислота, которая играет важную роль в биохимических процессах роста и развития многих организмов, в том числе бактерий. Некоторые исследования показывают, что он может служить важным метаболическим и энергетическим источником для роста и выживаемости *B. thuringiensis* [17].

Однако эффект пролина на *B. thuringiensis* может быть факультативным и зависеть от условий культивирования. Так, небольшое количество исследований указывают на то, что его высокие концентрации могут оказывать ингибирующий эффект на рост бактерии, особенно при наличии других богатых азотом источников [18].

Частота встречаемости (%) питательных потребностей выделенных вариантов БГКП  
 и рода *Bacillus* в отдельных аминокислотах

Table 3

Frequency of occurrence (%) of nutritional requirements of isolated  
 coliform and the genus *Bacillus* variants in individual amino acids

Аминокислота		БГКП	<i>B. cereus</i>	<i>B. subtilis</i>	<i>B. thuringiensis</i>	<i>B. mycoides</i>
Аргинин	ББЗ	42	48	20	66	42
	ПГРЭЗ	63	85	92	0	50
Гистидин	ББЗ	27	50	41	83	72
	ПГРЭЗ	0	84	43	22	0
Лизин	ББЗ	63	66	62	99	63
	ПГРЭЗ	66	92	94	63	92
Цистеин	ББЗ	42	83	24	33	42
	ПГРЭЗ	44	92	0	0	32
Пролин	ББЗ	0	49	40	96	30
	ПГРЭЗ	20	84	90	90	95
Лейцин	ББЗ	79	66	60	84	50
	ПГРЭЗ	62	88	62	63	86
Тирозин	ББЗ	80	84	83	83	50
	ПГРЭЗ	52	71	42	85	63
Серин	ББЗ	82	85	64	80	50
	ПГРЭЗ	44	90	25	0	82
Метионин	ББЗ	73	98	85	49	42
	ПГРЭЗ	15	87	94	72	88
Глутамин	ББЗ	42	100	100	100	30
	ПГРЭЗ	20	95	89	90	52

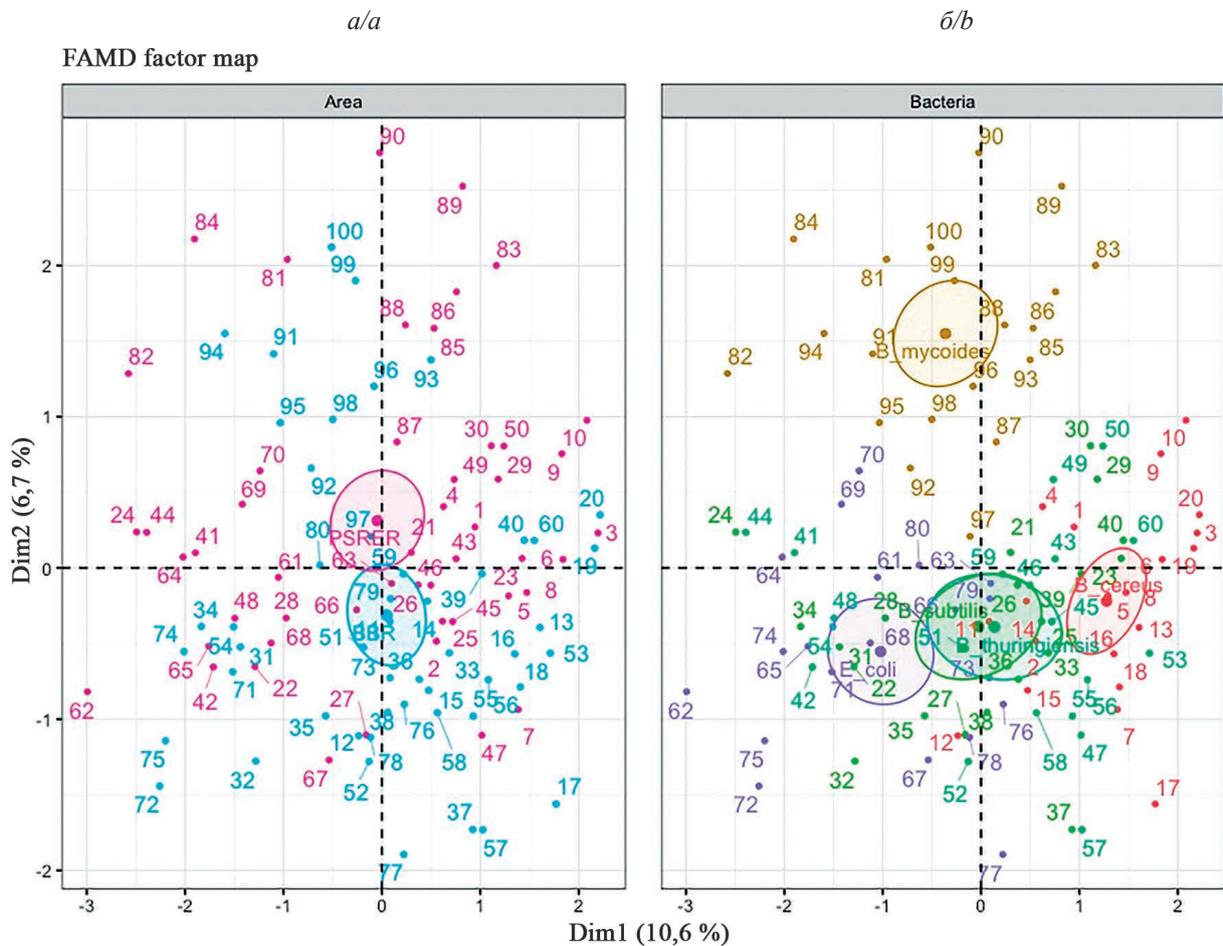
Следует отметить низкий уровень ауксотрофности бактерии *B. mycoides*, выделенной из обоих образцов почвы, к глутамину в отличие от остальных представителей рода *Bacillus*.

Для более детального анализа структуры связей между измеряемыми параметрами в работе применен метод факторного анализа, позволяющий сократить размерность исходного вектора измерений и перейти к новым переменным (факторам), корреляция между которыми равна нулю. Полученные факторы – причины, объясняющие множество частных (парных) корреляционных зависимостей – позволяют объединить между собой исходные параметры по принципу наибольшей корреляции.

Не вдаваясь в детальное рассмотрение и интерпретацию результатов факторного анализа, можно отметить, что полученные данные хорошо разделяются по признаку территории отбора проб (рис. 1а), а также по признаку принадлежности к определенному виду бактерий (рис. 1б).

В целом, факторы, связанные с территорией отбора проб и видовой принадлежностью, объясняют около 20 % суммарной вариабельности (изменчивости) ауксотрофии выделенных микроорганизмов. Как следует из данных, представленных в левой части (рис. а), выделенные варианты БГКП и рода *Bacillus* в целом различаются по потребностям в отдельных аминокислотах в зависимости от территории, с которой были отобраны образцы почв для анализа. Причем, сопоставив данные, представленные в левой и правой части (рис. б), можно отметить, что данное различие в большей мере обусловлено дифференцированными показателями ауксотрофности бактерии *B. mycoides*.

В целом следует подчеркнуть, что использованный метод факторного анализа позволяет достаточно хорошо классифицировать бактерии по их видовой принадлежности в зависимости от частоты встречаемости питательных потребностей в отдельных аминокислотах. Из данных, представленных в правой части (рис. б), можно заключить, что БГКП, а также *B. mycoides* и *B. cereus* различаются по признаку наличия/отсутствия ауксотрофности к определенной аминокислоте, в то время как бактерии *B. subtilis* и *B. thuringiensis* имеют практически идентичные показатели ауксотрофности по всем десяти проанализированным аминокислотам.



Числа 1–100 – порядковый номер наблюдения в наборе данных, PSRER – ППРЭЗ, BBR – ББЗ

Рис. Карта распределения бактерий по признаку наличия/отсутствия ауксотрофии к аминокислотам в двумерной плоскости факторов, связанных с территорией а) отбора проб (Dim2) и б) видовой принадлежностью (Dim1)

The numbers 1–100 are the ordinal number of the observation in the data set, PSRER – PGREZ, BBR – BBZ

Fig. A map of the distribution of bacteria based on the presence/absence of auxotrophy to amino acids in the two-dimensional plane of factors related a) to the sampling area (Dim2) and b) species (Dim1)

## Заключение

1. Выделены и идентифицированы микроорганизмы БГКП, а также рода *Bacillus* из проб почв, подвергшихся длительному воздействию ионизирующего излучения (ППРЭЗ) и находившихся в условиях его естественного фонового уровня (ББЗ). Общее микробное число составило  $31,8 \cdot 10^6 \pm 2$  и  $23,4 \cdot 10^6 \pm 2$  в пересчете на 1 г почвы соответственно.

2. Проведена оценка встречаемости ауксотрофных вариантов среди выделенных представителей рода *Bacillus* и БГКП. Установлено, что показатели частоты встречаемости ауксотрофных вариантов исследованных микроорганизмов, выделенных из образцов почв ППРЭЗ, были в среднем в 1,4–5,2 раза больше в зависимости от вида микроорганизма.

3. Проведен анализ питательных потребностей ауксотрофных вариантов условно-патогенных микроорганизмов, находившихся под длительным воздействием ионизирующего излучения, а также в условиях его естественного фонового уровня. Показано, что выделенные варианты БГКП и рода *Bacillus* в целом различаются по потребностям в отдельных аминокислотах в зависимости от территории, с которой были отобраны образцы почв для анализа. Причем данное различие в большей мере обусловлено дифференцированными показателями ауксотрофности бактерии *B. mycooides*.

4. Проведенный анализ частоты встречаемости ауксотрофных вариантов условно-патогенных микроорганизмов, находившихся под длительным воздействием ионизирующего излучения, может является необходимым элементом комплексной процедуры разработки биоиндикационной системы тестовых микробиологических показателей для оценки состояния белорусских ландшафтов.

## Библиографические ссылки

1. Домрачева ЛИ, Ашихмина ТЯ, редакторы. *Устойчивость микробных комплексов почвы к антропогенным факторам среды*. Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН; 2019. 254 с.
2. Линге ИИ, Крышев ИИ, редакторы. *Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»*. Москва: [б. и.]; 2021. 555 с.
3. Stepanov AL, Tsvetnova OB, Panikov SN. Changes in the structure of the microbial community under the influence of oil and radioactive pollution. *Eurasian Soil Science*. 2012;45:1169–1173.
4. Durrell LW, Lora MS. Fungi isolated in culture from soils of the Nevada Test Site. *Mycologia*. 1960;52:636–641.
5. Kieft TL, Kovacik WP, Ringelberg DB, White DC, Haldeman DL, Amy PS, Hersman LE. Factors limiting microbial growth and activity at a proposed high-level nuclear repository, Yucca Mountain, Nevada. *Applied and Environmental Microbiology*. 1997;63:3128–3133.
6. Dighton J, Tugay T, Zhdanova N. Fungi and ionizing radiation from radionuclides. *FEMS*. 2008;281:109–120.
7. Wehrden Hv, Fischer J, Brandt P, Wagner V, Kümmerer K, Kuemmerle T, Nagel A, Olsson O, Hostert P. Consequences of nuclear accidents for biodiversity and ecosystem services. *Conservation Letters*. 2012;5:81–89.
8. Васильев ДА, Калдыркаев АИ, Феоктистова НА, Алёшкин АВ *Идентификация бактерий *Bacillus cereus* на основе их фенотипической характеристики*. Ульяновск: НИИЦМиБ УЛГСХА им. П. А. Столыпина; 2013. 98 с.
9. Власенко ВС, Елеусизова АТ, Байсеитов СТ, Ансabayaва ЛС Методы индикации бактерий группы кишечной палочки и *E. coli* в мясе. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2021; 2(42):50–57.
10. Clowes RC, Hayes W. *Experiments in microbial genetics*. Oxford: Blackwell scientific publications; 1968. 248 p.
11. Асеева ИВ, и др. *Методы почвенной микробиологии и биохимии*. Москва: Издательство МГУ; 1991. 302 с.
12. Сыса АГ, Живицкая ЕП. *Статистический анализ в биологии и медицине*. Минск : ИВЦ Минфина; 2018. 140 с.
13. Pagès J. *Multiple Factor Analysis by Example Using R*. New York: Chapman and Hall/CRC; 2014. 272 p.
14. Kassambara A. *Practical guide to principal component methods in R*. New York: STDHA; 2017. 169 p.
15. Ferla MP, Patrick WM. Bacterial methionine biosynthesis. *Microbiology (Reading)*. 2014;160(Pt 8):1571–1584.
16. Gruzdev N, Hacham Y, Haviv H. Conversion of methionine biosynthesis in *Escherichia coli* from trans- to direct-sulfurylation enhances extracellular methionine levels. *Microbial Cell Factories*. 2023;22:151.
17. Ibrahim MA, Griko N, Junker M, Bulla LA. *Bacillus thuringiensis*: a genomics and proteomics perspective. *Bioeng Bugs*. 2010;1(1):31–50.
18. Christgen SL, Becker DF. Role of Proline in Pathogen and Host Interactions. *Antioxid Redox Signal*. 2019;30(4):683–709.

## References

1. Domracheva LI, Ashikhmina TY, editors. *Ustoiichivost' mikrobykh kompleksov pochvy k antropogennym faktorom sredy* [Stability of soil microbial complexes to anthropogenic environmental factors]. Syktyvkar: IB Federal Research Center Komi Scientific Center Ural Branch RAS; 2019. 254 p. Russian.
2. Linge AI, Kryshev AI, editors. *Radioekologicheskaya obstanovka v regionakh raspolozheniya predpriyatii Gosudarstvennoy korporatsii po atomnoy energii «Rosatom»* [Radioecological situation in the regions where enterprises of the State Atomic Energy Corporation Rosatom are located]. Moscow: [publisher unknown]; 2021. 555 p. Russian.
3. Stepanov AL, Tsvetnova OB, Panikov SN. Changes in the structure of the microbial community under the influence of oil and radioactive pollution. *Eurasian Soil Science*. 2012;45:1169–1173.
4. Durrell LW, Lora MS. Fungi isolated in culture from soils of the Nevada Test Site. *Mycologia*. 1960;52:636–641.
5. Kieft TL, Kovacik WP, Ringelberg DB, White DC, Haldeman DL, Amy PS, Hersman LE. Factors limiting microbial growth and activity at a proposed high-level nuclear repository, Yucca Mountain, Nevada. *Applied and Environmental Microbiology*. 1997;63:3128–3133.
6. Dighton J, Tugay T, Zhdanova N. Fungi and ionizing radiation from radionuclides. *FEMS*. 2008;281:109–120.
7. Wehrden Hv, Fischer J, Brandt P, Wagner V, Kümmerer K, Kuemmerle T, Nagel A, Olsson O, Hostert P. Consequences of nuclear accidents for biodiversity and ecosystem services. *Conservation Letters*. 2012;5:81–89.
8. Vasil'yev DA, Kaldyrkayev AI, Feoktistova NA, Aleshkin AV. *Identifikatsiya bakteriy Bacillus cereus po ikh fenotipicheskim priznakam* [Identification of *Bacillus cereus* bacteria based on their phenotypic characteristics]. Ulyanovsk: NIITSMIB Ugsha named after P. A. Stolypin; 2013. 98 p. Russian.
9. Vlasenko VS, Yeleusizova AT, Bayseitov ST, Ansabayeva LS. *Metody opredeleniya bakteriy gruppy E. coli v myase* [Methods of indication of *E. coli* group bacteria in meat]. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*; 2021;2(42):50–57. Russian.
10. Clowes RC, Hayes W. *Experiments in microbial genetics*. Oxford: Blackwell scientific publications; 1968. 248 p.
11. Aseeva IV, et al. *Metody pochvennoy mikrobiologii i biokhimii* [Methods of soil microbiology and biochemistry]. Moscow: Moscow State University Publishing House; 1991. 302 p. Russian.
12. Sysa AG, Zhivitskaya EP. *Statisticheskii analiz v biologii i meditsine* [Statistical analysis in biology and medicine]. Minsk: Information Computing Center of the Ministry of Finance; 2018. 140 p. Russian.
13. Pagès J. *Multiple Factor Analysis by Example Using R*. New York: Chapman and Hall/CRC; 2014. 272 p.
14. Kassambara A. *Practical guide to principal component methods in R*. New York: STDHA; 2017. 169 p.
15. Ferla MP, Patrick WM. Bacterial methionine biosynthesis. *Microbiology (Reading)*. 2014;160(Pt 8):1571–1584.
16. Gruzdev N, Hacham Y, Haviv H. Conversion of methionine biosynthesis in *Escherichia coli* from trans- to direct-sulfurylation enhances extracellular methionine levels. *Microbial Cell Factories*. 2023;22:151.
17. Ibrahim MA, Griko N, Junker M, Bulla LA. *Bacillus thuringiensis*: a genomics and proteomics perspective. *Bioeng Bugs*. 2010;1(1):31–50.
18. Christgen SL, Becker DF. Role of Proline in Pathogen and Host Interactions. *Antioxid Redox Signal*. 2019;30(4):683–709.

Статья поступила в редколлегию 13.12.2023.  
Received by editorial board 13.12.2023.

## ДЕТАЛЬНАЯ МОРФОМЕТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛИЧИНОК КАШТАНОВОЙ МИНИРУЮЩЕЙ МОЛИ (*CAMERARIA OHRIDELLA* DESCHKA & DIMIČ, 1986)

А. С. РОГИНСКИЙ<sup>1)</sup>, С. В. БУГА<sup>1)</sup>,

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

Каштановая минирующая моль, или охридский минер (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986; Lepidoptera: Gracillariidae) – инвазивный вредитель конского каштана обыкновенного (*Aesculus hippocastanum* L.; Sapindaceae) в зеленых насаждениях Беларуси и всей умеренной зоны континентальной Европы. Данный чужеродный вид имеет балканское происхождение, включен в Черную книгу инвазивных видов животных Беларуси и в аналогичные списки сопредельных стран и регионов. В исследовании представлена детальная морфометрическая характеристика личинок 1–5-го возрастов *C. ohridella*. Установлены значения параметров морфометрии личинок каштановой минирующей моли, в числе которых длина и ширина ротового аппарата, головной капсулы, 1–3 сегментов груди и 1–10 сегментов брюшка. Коэффициент вариации параметров морфометрии головного отдела личинок каштановой минирующей моли находился в диапазоне от 5,51 до 20,87 %. Имел место выраженный прирост значений морфометрических показателей от 1-го ко 2-му возрасту, умеренный от 2-го к 3-му, и гораздо более интенсивный рост от 3-го к 4-му и от 4-го к 5-му. Для определения возрастной принадлежности личинок предлагается возможным использовать такие параметры морфометрии, как ширина ротового аппарата, длина ротового аппарата, длина головной капсулы и длина головного отдела. Предложенный методический подход позволяет устанавливать возрастную структуру группировок личинок каштановой минирующей моли в ходе биоэкологических исследований и мониторинга популяций этого опасного вредителя (конского каштана обыкновенного) в зеленых насаждениях Беларуси.

**Ключевые слова:** биологические инвазии; зеленые насаждения; идентификация возраста; минирующие вредители; моли-пестрянки; чужеродные виды; *Cameraria ohridella*

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы «Особенности структуры сообществ опылителей и минеров-филлобионтов лесных экосистем юго-запада Белорусского Поозерья» Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» (№ государственной регистрации 20211658).

### Образец цитирования:

Рогинский АС, Буга СВ. Детальная морфометрическая характеристика личинок каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986). *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;1:19–31.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-19-31>

### For citation:

Roginsky AS, Buga SV. Detail morphometric characteristics of the horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) larvae. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;1:19–31. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-19-31>

### Автор:

**Алексей Сергеевич Рогинский** – кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии биологического факультета.  
**Сергей Владимирович Буга** – доктор биологических наук, профессор; заведующий кафедрой зоологии биологического факультета.

### Author:

**Aleksei S. Roginsky**, PhD (biology), docent at the department of zoology, faculty of biology.  
[roginski@gmail.com](mailto:roginski@gmail.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)

## DETAIL MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE HORSE-CHESTNUT LEAF MINER (*CAMERARIA OHRIDELLA* DESCHKA & DIMIČ, 1986) LARVAE

A. S. ROGINSKY<sup>a</sup>, S. V. BUGA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University,  
4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus  
Corresponding author: A. S. Roginsky (roginski@gmail.com)

The horse-chestnut leaf miner, or Ochrid miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986; Lepidoptera: Gracillariidae) is an invasive pest of the common chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.; Sapindaceae) in green areas of Belarus and the whole temperate zone of continental Europe. This alien species of Balkan origin is included in the “Black Book of Invasive Animal Species of Belarus”, as well as in similar lists of neighbouring countries and regions. The paper provides detailed morphometric characteristics of the 1<sup>st</sup>–5<sup>th</sup> instar larvae of the horse-chestnut leaf miner *C. ohridella*. The length and the width of the mouthparts, head capsule, 1<sup>st</sup>–3<sup>rd</sup> segments of the thorax and 1<sup>st</sup>–10<sup>th</sup> segments of the abdomen were measured. The values of morphometric indices slightly increased from 1<sup>st</sup> to 2<sup>nd</sup> instar, moderately from 2<sup>nd</sup> to 3<sup>rd</sup> instar, and much higher from 3<sup>rd</sup> to 4<sup>th</sup> and from 4<sup>th</sup> to 5<sup>th</sup> instar. Such morphometric parameters as the width and the length of the mouthparts, the length of the head capsule and the length of the head can be used for identification of larval instars. The proposed methodological approach allows to identify the instar structure of *C. ohridella* larvae during bioecological studies and monitoring of populations of this dangerous pest of the common chestnut in green areas of Belarus.

**Keywords:** alien species; biological invasions; *Cameraria ohridella*; Gracillariidae; green areas; instar identification; mining pests.

**Acknowledgements.** This study was supported as a part of the research project «Specific features of the structure of pollinator and mining phyllobiont communities of forest ecosystems on the south-west of the Belarusian Lakeland» of the state program of scientific research «Natural Resources and Environment» (No. 20211658).

### Введение

Личинкам минирующих молей-пестрянок (Lepidoptera: Gracillariidae) в ходе индивидуального развития свойственна экологическая дифференциация вследствие смены способа питания: личинки младших возрастов являются так называемыми «сокоедками», тогда как на старших возрастах переходят к стандартному для грызущих фитофагов потреблению мезофилла листовых пластинок [1]. Соответствующие изменения претерпевает и их морфология, что является предметом рассмотрения в работах по морфологии, биологии и экологии отдельных видов Gracillariidae (например, в классических работах, одним из авторов которых является Н. Šefrová [2; 3]). Знание особенностей морфологии личинок этих фитофагов важно не только с научно-теоретической точки зрения, но и практически значимо, поскольку предоставляет дополнительные сведения, используемые при идентификации и выяснении фазы развития этих вредителей плодовых и декоративных культур.

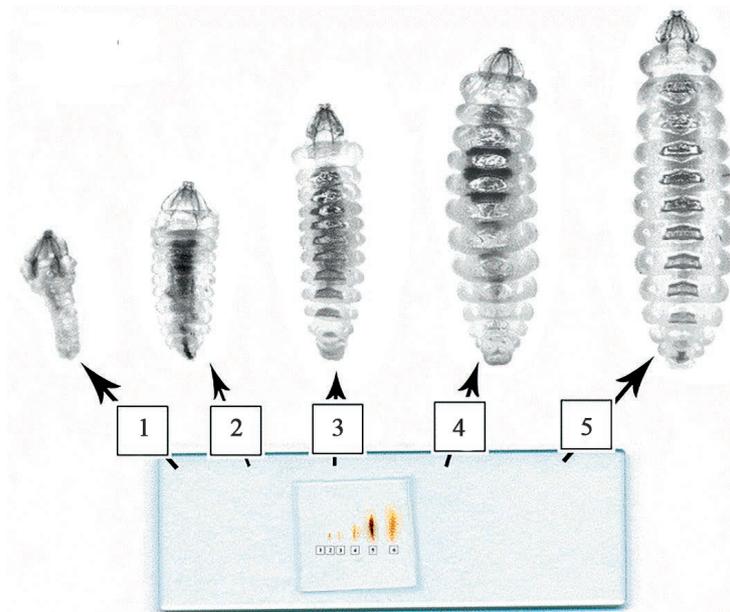
Каштановая минирующая моль, или охридский минер (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) в настоящее время является одним из наиболее известных и широко распространенных в континентальной Европе инвайдером, который в силу исключительной вредности включен в оба издания Черной книги инвазивных животных Беларуси [4], как и аналогичные списки сопредельных стран [5]. Личинки *C. ohridella* являются филлобионтами, развиваясь в пятновидных минах. В Беларуси уже к июлю практически повсеместно достигается высокий уровень заселенности повреждаемых минером конских каштанов обыкновенных (*Aesculus hippocastanum* L.), колонизированные листья и кроны в целом утрачивают декоративность, растения досрочно теряют листву [6; 7].

Охридский минер как новый для науки вид был описан в 1986 г. по регистрациям в окрестностях Охридского озера на территории современной Северной Македонии [8]. Уже в работе 2000 г. Н. Šefrová и V. Skuhřavý [2] приводят описание морфологии преимагинальных стадий *C. ohridella* с более подробным рассмотрением строения личинок 4-го возраста, активное питание которых определяет ускоренное увеличение площади листовых мин. Общие сведения о морфологии личинок охридского минера опубликовал Н. Dimič с соавторами [9]. Исключительно высокий уровень вредности инвайдера послужил предпосылкой для развертывания исследований морфологии, биологии и экологии каштановой минирующей моли в рамках международной программы ЮНЕСКО – Global Invasive Species Program «CONTROCAM» [10]. В рамках программы исследований рассмотрены вопросы и общей морфологии личинок *C. ohridella* [11]. Использование возможностей электронной микроскопии позволило детализировать морфологические описания личинок разных возрастов

и высказать предположение, что эти данные могут быть полезны для определения возрастной принадлежности личинок *C. ohridella* [12]. Размерные характеристики личинок каштановой минирующей моли приведены в обзорных публикациях украинских исследователей [13; 14], однако, опираясь на них, приходится констатировать, что имеющихся в литературе данных недостаточно для точного установления возраста личинок минера, а соответствующие методики и вовсе отсутствуют. Между тем, данные морфометрии позволяют определять возрастную принадлежность личинок других Gracillariidae, в частности, белоакациевых минирующих молей [15]. Результаты ранее выполненных нами исследований морфологии личинок каштановой минирующей моли подтвердили возможность использования для этих целей данных морфометрии личинок (в частности, такого параметра, как ширина ротового аппарата) [16]. Этим определяется целесообразность обращения к подробному рассмотрению морфометрии преимагинальных стадий *C. ohridella* с тем, чтобы составить детальную морфометрическую характеристику личинок каштановой минирующей моли разных возрастов.

### Материалы и методы исследования

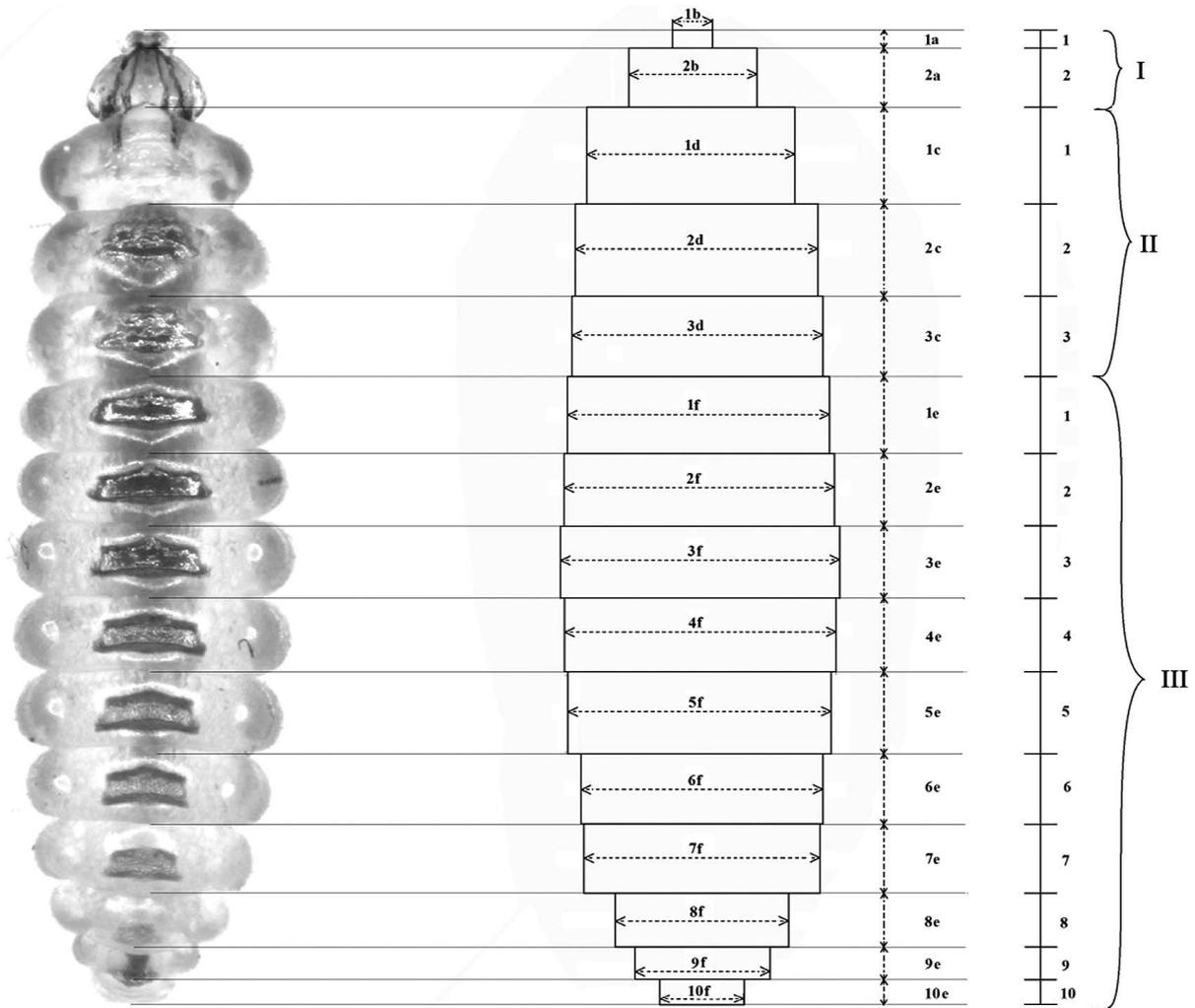
Сбор материала для формирования выборок личинок каштановой минирующей моли разных возрастов выполнялся в г. Минске (GPS – координаты точки N53.840614, E27.477162) на протяжении всего полевого сезона (май – октябрь) 2016 г. с интервалом 3–8 дней. Выборки листовых пластинок (не менее 35 в каждой) помещали в соответствующих размеров полиэтиленовые пакеты с замком zip-lock с тем, чтобы исключить быструю потерю влаги и последующее высыхание материала, после чего размещали в морозильнике с целью прекращения развития личинок. Мины вскрывали под бинокулярным микроскопом Stemi 2000. Фотографирование гусениц младших и старших возрастов выполнено фотоаппаратом Canon 1100d. Для определения возраста и формирования выборок использовали изготовленный нами эталонный микроскопический препарат (рис. 1) личинок *C. ohridella* разных возрастов. Изготовление препаратов личинок *C. ohridella* проводили с использованием заключающей среды *Entellan* в соответствии с адаптированной для работы с данным объектом методикой [17]. Для съемки промеров использован микроскоп *Zeiss Axiostar +* с мерной шкалой. Пересчет полученных данных осуществляли с переводным коэффициентом, полученным с использованием окуляр-микрометра. Схема промеров частей головного отдела, а также грудных и брюшных сегментов личинок каштановой минирующей моли представлена на рис. 2. Морфометрические данные заносили в электронные таблицы, статистический анализ выполнен средствами программного пакета PAST 4.15 [18].



Примечание. 1 – личинка первого возраста, 2 – личинка второго возраста,  
3 – личинка третьего возраста, 4 – личинка четвертого возраста, 5 – личинка пятого возраста

Рис. 1. Эталонный препарат для определения возрастов личинок каштановой минирующей моли  
(*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986)

Fig. 1. Reference microscopic preparation for identification of larval instars of the horse-chestnut leaf miner  
(*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986)



I – промеры головной капсулы (1 a – длина ротового аппарата; 2 a – длина головной капсулы; 1 b – ширина ротового аппарата; 2 b – ширина головной капсулы); II – промеры грудного отдела (1 c – длина первого сегмента; 2 c – длина второго сегмента; 3 c – длина третьего сегмента; 1 d – ширина первого сегмента; 2 d – ширина второго сегмента; 3 d – ширина третьего сегмента); III – промеры брюшного отдела (1 e – длина первого сегмента; 2 e – длина второго сегмента; 3 e – длина третьего сегмента; 4 e – длина четвертого сегмента; 5 e – длина пятого сегмента; 6 e – длина шестого сегмента; 7 e – длина седьмого сегмента; 8 e – длина восьмого сегмента; 9 e – длина девятого сегмента; 10 e – длина десятого сегмента; 1 f – ширина первого сегмента; 2 f – ширина второго сегмента; 3 f – ширина третьего сегмента; 4 f – ширина четвертого сегмента; 5 f – ширина пятого сегмента; 6 f – ширина шестого сегмента; 7 f – ширина седьмого сегмента; 8 f – ширина восьмого сегмента; 9 f – ширина девятого сегмента; 10 f – ширина десятого сегмента)

Рис. 2. Личинка каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) 5-го возраста: схема съемки морфометрических параметров

I – measurements of the head capsule (1 a – length of the mouthparts; 2 a – length of the head capsule; 1 b – width of the mouthparts; 2 b – width of the head capsule); II – measurements of the thorax (1 c – length of the first segment; 2 c – length of the second segment; 3 c – length of the third segment; 1 d – width of the first segment; 2 d – width of the second segment; 3 d – width of the third segment); III – measurements of the abdominal segments (1 e – length of the first segment; 2 e – length of the second segment; 3 e – length of the third segment; 4 e – length of the fourth segment; 5 e – length of the fifth segment; 6 e – length of the sixth segment; 7 e – length of the seventh segment; 8 e – length of the eighth segment; 9 e – length of the ninth segment; 10 e – length of the tenth segment; 1 f – width of the first segment; 2 f – width of the second segment; 3 f – width of the third segment; 4 f – width of the fourth segment; 5 f – width of the fifth segment; 6 f – width of the sixth segment; 7 f – width of the seventh segment; 8 f – width of the eighth segment; 9 f – width of the ninth segment; 10 f – width of the tenth segment)

Fig. 2. 5<sup>th</sup> instar larva of the horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986): scheme of morphometric measurements

Поскольку личинки 6-го возраста не питаются, и их легко отличить по отсутствию выраженной головной капсулы, анализировали данные морфометрии для личинок 1–5-го возрастов. Для установления статистической достоверности различий использован непараметрический U-критерий Манна – Уитни для независимых выборок [18].

### Результаты исследования и их обсуждение

Выполненная съемка морфометрических показателей личинок разных возрастов позволила установить диапазоны варьирования значений ширины (табл. 1) и длины (табл. 2) частей головного отдела и сегментов туловища.

Таблица 1

Ширина частей головного отдела и сегментов туловища личинок 1-го – 5-го возрастов каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986)

Table 1

Width of head parts and body segments of 1<sup>st</sup>– 5<sup>th</sup> instar larvae of the horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986)

Отделы тела	Промеры	<i>N</i>	<i>Mean</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>SD</i>	<i>SE</i>
<b>1-ый возраст</b>							
Головной	ротовой аппарат	36	0,042	0,025	0,050	0,005	0,393
	головная капсула	36	0,146	0,090	0,165	0,016	0,393
Грудной	1 сегмент	36	0,222	0,160	0,28	0,033	0,393
	2 сегмент	32	0,196	0,095	0,25	0,038	0,414
	3 сегмент	31	0,175	0,080	0,24	0,032	0,421
Брюшной	1 сегмент	30	0,137	0,040	0,19	0,033	0,427
	2 сегмент	30	0,129	0,055	0,28	0,046	0,427
	3 сегмент	29	0,118	0,020	0,17	0,037	0,434
	4 сегмент	26	0,110	0,030	0,17	0,037	0,456
	5 сегмент	20	0,116	0,045	0,17	0,035	0,512
	6 сегмент	18	0,116	0,060	0,16	0,028	0,536
	7 сегмент	17	0,112	0,050	0,16	0,030	0,550
	8 сегмент	17	0,094	0,030	0,15	0,034	0,550
	9 сегмент	14	0,094	0,040	0,14	0,030	0,597
	10 сегмент	12	0,066	0,040	0,09	0,020	0,637
<b>2-ой возраст</b>							
Головной	ротовой аппарат	36	0,06	0,05	0,070	0,005	0,393
	головная капсула	36	0,225	0,125	0,255	0,021	0,393
Грудной	1 сегмент	36	0,325	0,230	0,420	0,044	0,393
	2 сегмент	36	0,287	0,175	0,40	0,045	0,393
	3 сегмент	36	0,270	0,160	0,370	0,046	0,393
Брюшной	1 сегмент	36	0,256	0,140	0,360	0,052	0,393
	2 сегмент	36	0,254	0,140	0,370	0,055	0,393
	3 сегмент	36	0,251	0,145	0,360	0,056	0,393
	4 сегмент	36	0,247	0,140	0,355	0,056	0,393
	5 сегмент	36	0,233	0,130	0,340	0,054	0,393
	6 сегмент	36	0,223	0,120	0,385	0,063	0,393
	7 сегмент	36	0,20	0,120	0,360	0,053	0,393
	8 сегмент	36	0,175	0,120	0,275	0,042	0,393
	9 сегмент	36	0,154	0,110	0,230	0,027	0,393
	10 сегмент	36	0,108	0,070	0,170	0,023	0,393
<b>3-ий возраст</b>							
Головной	ротовой аппарат	35	0,072	0,060	0,090	0,008	0,398
	головная капсула	35	0,229	0,200	0,255	0,012	0,398
Грудной	1 сегмент	35	0,369	0,270	0,430	0,039	0,398
	2 сегмент	35	0,334	0,240	0,430	0,044	0,398
	3 сегмент	35	0,324	0,250	0,430	0,044	0,398

Отделы тела	Промеры	<i>N</i>	<i>Mean</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>SD</i>	<i>SE</i>
Брюшной	1 сегмент	35	0,312	0,220	0,400	0,047	0,398
	2 сегмент	35	0,312	0,220	0,420	0,049	0,398
	3 сегмент	35	0,318	0,220	0,425	0,048	0,398
	4 сегмент	35	0,317	0,210	0,415	0,044	0,398
	5 сегмент	35	0,306	0,200	0,410	0,044	0,398
	6 сегмент	35	0,286	0,190	0,380	0,041	0,398
	7 сегмент	35	0,261	0,160	0,340	0,038	0,398
	8 сегмент	35	0,224	0,130	0,300	0,040	0,398
	9 сегмент	34	0,179	0,120	0,230	0,029	0,403
	10 сегмент	34	0,124	0,090	0,170	0,023	0,403
<b>4-ый возраст</b>							
Головной	ротовой аппарат	37	0,115	0,075	0,195	0,021	0,388
	головная капсула	37	0,361	0,280	0,440	0,042	0,388
Грудной	1 сегмент	37	0,561	0,380	0,790	0,099	0,388
	2 сегмент	37	0,493	0,340	0,700	0,095	0,388
	3 сегмент	37	0,488	0,330	0,710	0,106	0,388
Брюшной	1 сегмент	37	0,504	0,330	0,720	0,116	0,388
	2 сегмент	37	0,500	0,320	0,730	0,113	0,388
	3 сегмент	37	0,505	0,300	0,740	0,116	0,388
	4 сегмент	37	0,496	0,280	0,720	0,118	0,388
	5 сегмент	37	0,472	0,270	0,670	0,106	0,388
	6 сегмент	37	0,442	0,230	0,620	0,099	0,388
	7 сегмент	37	0,397	0,195	0,590	0,087	0,388
	8 сегмент	37	0,345	0,170	0,500	0,075	0,388
	9 сегмент	37	0,306	0,180	0,490	0,067	0,388
	10 сегмент	37	0,205	0,110	0,290	0,042	0,388
<b>5-ый возраст</b>							
Головной	ротовой аппарат	36	0,175	0,130	0,210	0,018	0,393
	головная капсула	36	0,514	0,410	0,650	0,049	0,393
Грудной	1 сегмент	36	0,835	0,610	1,040	0,112	0,393
	2 сегмент	36	0,837	0,550	1,150	0,168	0,393
	3 сегмент	36	0,863	0,590	1,210	0,179	0,393
Брюшной	1 сегмент	36	0,902	0,600	1,230	0,192	0,393
	2 сегмент	36	0,920	0,590	1,260	0,209	0,393
	3 сегмент	36	0,931	0,590	1,300	0,219	0,393
	4 сегмент	36	0,908	0,570	1,260	0,215	0,393
	5 сегмент	36	0,856	0,530	1,190	0,199	0,393
	6 сегмент	36	0,778	0,490	1,050	0,175	0,393
	7 сегмент	36	0,687	0,430	0,940	0,150	0,393
	8 сегмент	36	0,581	0,360	0,800	0,120	0,393
	9 сегмент	35	0,489	0,290	0,890	0,111	0,398
	10 сегмент	35	0,330	0,170	0,430	0,063	0,398

Примечание. *N* – объем выборки; *Mean* – средняя арифметическая; *Minimum & Maximum* – минимальное и максимальное значение; *SD* – Standard Deviation, стандартное отклонение; *SE* – Standard Error, стандартная ошибка средней.

Таблица 2

Длина частей головного отдела и сегментов туловища личинок 1-го и 2-го возрастов каштановой минирующей моли  
(*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986)

Table 2

Length of head parts and body segments of 1<sup>st</sup>– 5<sup>th</sup> instar larvae of the horse-chestnut leaf miner  
(*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986)

Отделы тела	Промеры	<i>N</i>	<i>Mean</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>SD</i>	<i>SE</i>
<b>1-ый возраст</b>							
Головной	ротовой аппарат	36	0,022	0,015	0,025	0,003	0,393
	головная капсула	36	0,079	0,060	0,090	0,007	0,393
Грудной	1 сегмент	26	0,078	0,045	0,130	0,022	0,456
	2 сегмент	25	0,052	0,030	0,080	0,012	0,464
	3 сегмент	25	0,049	0,030	0,080	0,012	0,464
Брюшной	1 сегмент	10	0,035	0,020	0,050	0,012	0,687
	2 сегмент	8	0,039	0,025	0,050	0,008	0,752
	3 сегмент	7	0,047	0,040	0,060	0,007	0,794
	4 сегмент	7	0,045	0,030	0,060	0,011	0,794
	5 сегмент	7	0,041	0,030	0,050	0,009	0,794
	6 сегмент	7	0,040	0,020	0,050	0,011	0,794
	7 сегмент	7	0,032	0,010	0,065	0,019	0,794
	8 сегмент	6	0,041	0,015	0,060	0,019	0,845
	9 сегмент	6	0,055	0,020	0,100	0,031	0,845
	10 сегмент	4	0,035	0,030	0,040	0,006	1,014
<b>2-ой возраст</b>							
Головной	ротовой аппарат	36	0,029	0,020	0,035	0,003	0,393
	головная капсула	36	0,120	0,095	0,140	0,009	0,393
Грудной	1 сегмент	36	0,114	0,070	0,155	0,018	0,393
	2 сегмент	36	0,073	0,045	0,110	0,016	0,393
	3 сегмент	36	0,068	0,035	0,115	0,018	0,393
Брюшной	1 сегмент	36	0,058	0,025	0,085	0,014	0,393
	2 сегмент	36	0,058	0,025	0,080	0,013	0,393
	3 сегмент	36	0,060	0,020	0,090	0,016	0,393
	4 сегмент	36	0,062	0,015	0,095	0,017	0,393
	5 сегмент	36	0,062	0,020	0,090	0,017	0,393
	6 сегмент	36	0,058	0,015	0,090	0,017	0,393
	7 сегмент	36	0,056	0,015	0,090	0,016	0,393
	8 сегмент	36	0,052	0,020	0,070	0,014	0,393
	9 сегмент	36	0,055	0,020	0,090	0,019	0,393
	10 сегмент	36	0,057	0,030	0,090	0,018	0,393
<b>3-ий возраст</b>							
Головной	ротовой аппарат	35	0,032	0,030	0,040	0,003	0,398
	головная капсула	35	0,128	0,100	0,150	0,011	0,398
Грудной	1 сегмент	35	0,173	0,120	0,210	0,019	0,398
	2 сегмент	35	0,098	0,070	0,130	0,016	0,398
	3 сегмент	35	0,095	0,060	0,120	0,015	0,398

Отделы тела	Промеры	<i>N</i>	<i>Mean</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>SD</i>	<i>SE</i>
Брюшной	1 сегмент	35	0,076	0,055	0,110	0,011	0,398
	2 сегмент	35	0,077	0,055	0,090	0,009	0,398
	3 сегмент	35	0,082	0,060	0,110	0,010	0,398
	4 сегмент	35	0,085	0,060	0,110	0,012	0,398
	5 сегмент	35	0,085	0,070	0,110	0,009	0,398
	6 сегмент	35	0,080	0,065	0,095	0,009	0,398
	7 сегмент	35	0,079	0,060	0,100	0,010	0,398
	8 сегмент	35	0,079	0,050	0,120	0,015	0,398
	9 сегмент	34	0,077	0,040	0,150	0,024	0,403
	10 сегмент	34	0,069	0,020	0,150	0,027	0,403
<b>4-ый возраст</b>							
Головной	ротовой аппарат	37	0,048	0,030	0,060	0,007	0,388
	головная капсула	37	0,211	0,145	0,290	0,034	0,388
Грудной	1 сегмент	37	0,224	0,140	0,330	0,052	0,388
	2 сегмент	37	0,142	0,070	0,230	0,048	0,388
	3 сегмент	37	0,143	0,060	0,230	0,045	0,388
Брюшной	1 сегмент	37	0,125	0,060	0,210	0,039	0,388
	2 сегмент	37	0,125	0,050	0,200	0,040	0,388
	3 сегмент	37	0,137	0,065	0,200	0,042	0,388
	4 сегмент	37	0,140	0,070	0,230	0,045	0,388
	5 сегмент	37	0,139	0,070	0,210	0,044	0,388
	6 сегмент	37	0,128	0,060	0,190	0,040	0,388
	7 сегмент	37	0,121	0,060	0,200	0,040	0,388
	8 сегмент	37	0,101	0,055	0,160	0,030	0,388
	9 сегмент	37	0,107	0,040	0,190	0,042	0,388
	10 сегмент	37	0,098	0,050	0,185	0,030	0,388
<b>5-ый возраст</b>							
Головной	ротовой аппарат	36	0,071	0,050	0,085	0,008	0,393
	головная капсула	36	0,325	0,220	0,440	0,052	0,393
Грудной	1 сегмент	36	0,380	0,280	0,500	0,063	0,393
	2 сегмент	36	0,302	0,145	0,530	0,104	0,393
	3 сегмент	36	0,310	0,125	0,540	0,108	0,393
Брюшной	1 сегмент	36	0,275	0,130	0,450	0,094	0,393
	2 сегмент	36	0,279	0,130	0,440	0,097	0,393
	3 сегмент	36	0,306	0,130	0,480	0,104	0,393
	4 сегмент	36	0,313	0,160	0,500	0,104	0,393
	5 сегмент	36	0,319	0,165	0,540	0,103	0,393
	6 сегмент	36	0,309	0,120	0,510	0,104	0,393
	7 сегмент	36	0,271	0,130	0,460	0,093	0,393
	8 сегмент	35	0,204	0,110	0,360	0,062	0,398
	9 сегмент	35	0,171	0,060	0,290	0,053	0,398
	10 сегмент	35	0,155	0,090	0,220	0,037	0,398

Примечание. *N* – объем выборки; *Mean* – средняя арифметическая; *Minimum & Maximum* – минимальное и максимальное значение; *SD* – Standard Deviation, стандартное отклонение; *SE* – Standard Error, стандартная ошибка средней

Таким образом, ширина головной капсулы личинок *C. ohridella* 1–5 возрастов варьировала в пределах от  $0,146 \pm 0,016$  мм до  $0,514 \pm 0,049$  мм (здесь и далее в качестве доверительных интервалов использовано стандартное отклонение (*SD*)). Для отдельных возрастов она составляла: 1-ый возраст –  $0,146 \pm 0,016$  мм, 2-ой возраст –  $0,225 \pm 0,021$  мм, 3-ий возраст –  $0,229 \pm 0,012$  мм, 4-ый возраст –  $0,361 \pm 0,042$  мм, 5-ый возраст –  $0,514 \pm 0,049$  мм. Ширина ротового аппарата личинок варьировала в пределах от  $0,042 \pm 0,005$  мм до

0,175 ± 0,018 мм. По возрастам ширина изменялась следующим образом: 1-ый возраст – 0,042 ± 0,005 мм, 2-ой возраст – 0,060 ± 0,005 мм, 3-ий возраст – 0,072 ± 0,008 мм, 4-ый возраст – 0,115 ± 0,021 мм, 5-ый возраст – 0,175 ± 0,018 мм.

Промеры частей головного отдела снимать легче вследствие более выраженной хитинизации. Они могли бы использоваться как основные показатели для установления возраста личинок минера. В табл. 3 сведены данные по длине частей головного отдела личинок *C. ohridella* разных возрастов.

Таблица 3

Длина головного отдела личинок каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) разных возрастов

Table 3

Head length of different instar larvae of the horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986)

Возраст	<i>N</i>	<i>Mean</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>SD</i>	<i>SE</i>
Первый	36	0,100	0,08	0,115	0,008	0,393
Второй	36	0,149	0,125	0,170	0,009	0,393
Третий	35	0,161	0,130	0,185	0,012	0,398
Четвертый	37	0,259	0,185	0,340	0,037	0,388
Пятый	36	0,396	0,290	0,510	0,054	0,393

Примечание. *N* – объем выборки; *Mean* – средняя арифметическая; *Minimum* & *Maximum* – минимальное и максимальное значение; *SD* – Standard Deviation, стандартное отклонение; *SE* – Standard Error, стандартная ошибка средней

Изменчивость признаков морфометрии может быть оценена расчетом стандартно используемого в описательной статистике коэффициента вариации (CV), который для значений морфометрических параметров головного отдела личинок *C. ohridella* варьировал в диапазоне от 5,51 до 20,87 %. У личинок 1–5-го возрастов коэффициент вариации параметра ширины ротового аппарата находился в пределах от 8,07 до 20,87 %, ширины головной капсулы – от 9,56 до 11,47 %, длины ротового аппарата – от 8,07 до 15,35 %, длины головной капсулы – от 5,51 до 15,97 %.

Визуализация на линейных графиках (рис. 3–7) позволяет нам иллюстрировать динамику приращения значений отдельных показателей от возраста к возрасту.

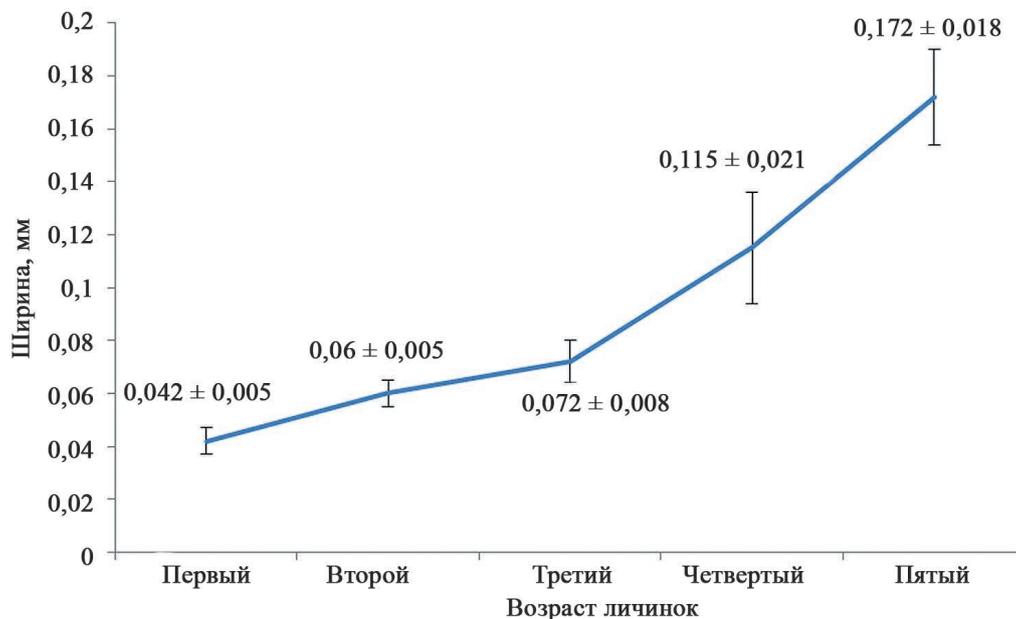


Рис. 3. Динамика увеличения средней ширины ротового аппарата личинок каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) от возраста к возрасту

Fig. 3. Dynamics of the instar-related increase in the mean width of the mouthparts of the horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) larvae

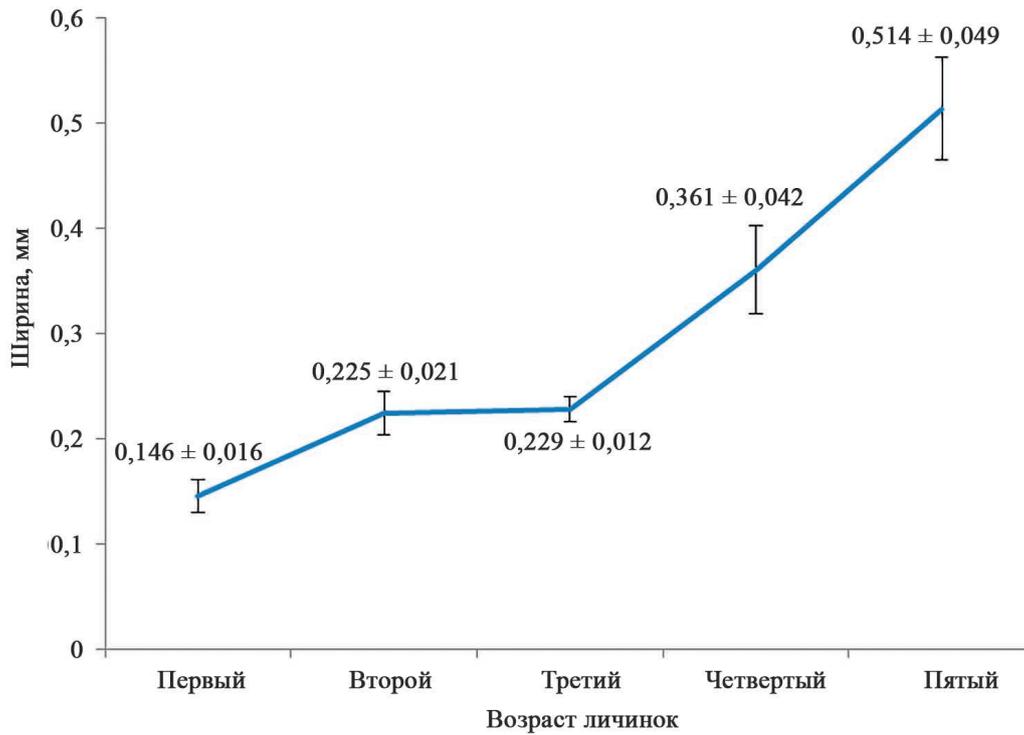


Рис. 4. Динамика увеличения средней ширины головной капсулы личинок каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) от возраста к возрасту

Fig. 4. Dynamics of the instar-related increase in the mean width of the head capsule of the horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) larvae

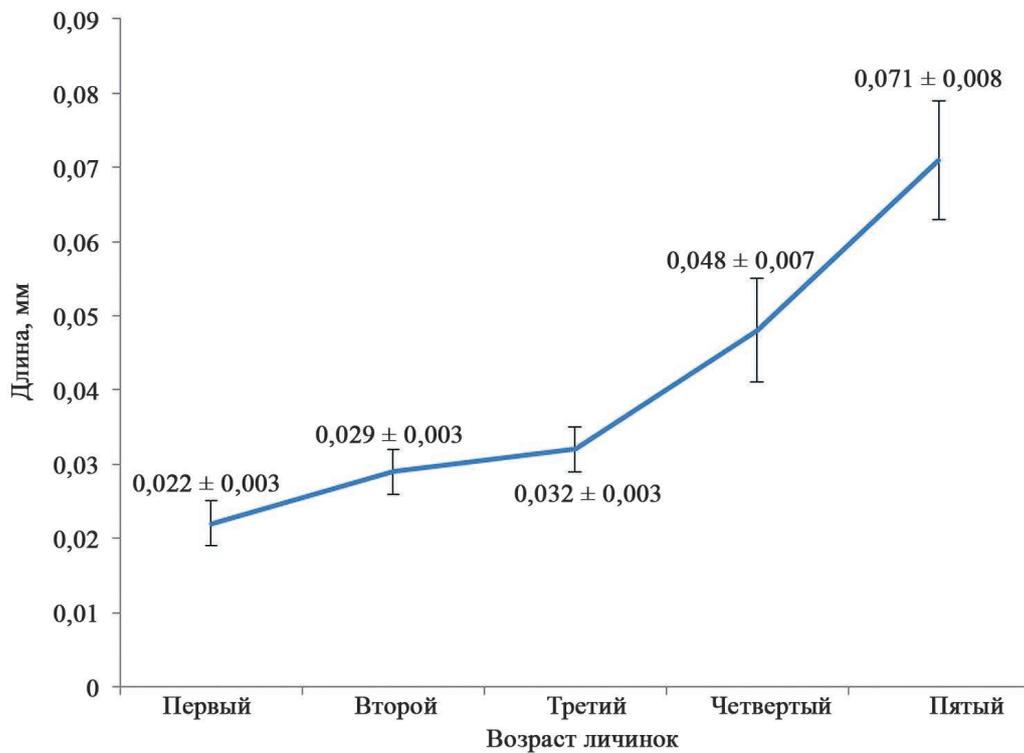


Рис. 5. Динамика увеличения средней длины ротового аппарата личинок каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) от возраста к возрасту

Fig. 5. Dynamics of the instar-related increase in the mean length of the mouthparts of the horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) larvae

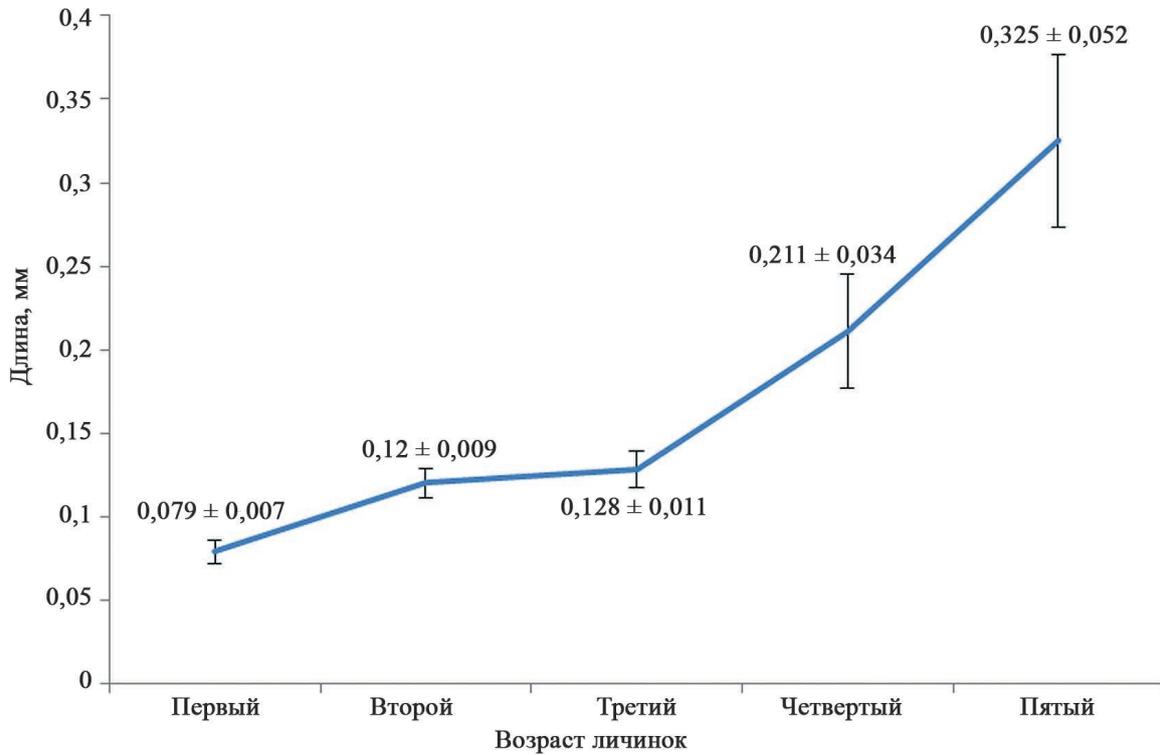


Рис. 6. Динамика увеличения средней длины головной капсулы личинок каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) от возраста к возрасту

Fig. 6. Dynamics of the instar-related increase in the mean length of the head capsule of the horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) larvae

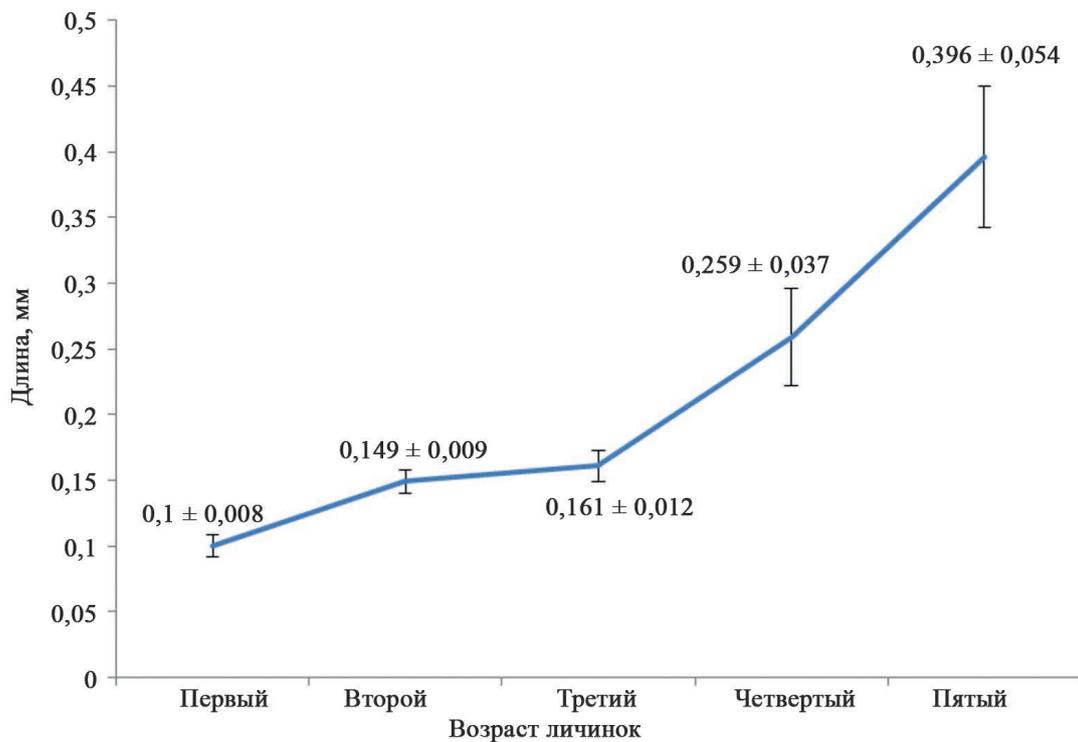


Рис. 7. Динамика увеличения длины головного отдела личинок каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) от возраста к возрасту

Fig. 7. Dynamics of the instar-related increase in the mean length of the head of the horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) larvae

В целом наблюдается выраженный прирост от 1-го ко 2-му возрасту, умеренный от 2-го к 3-му, а затем гораздо более интенсивный рост от 3-го к 4-му и от 4-го к 5-му. Также выполненная визуализация дает возможность оценить применимость тех или иных параметров морфометрии для разграничения личинок по возрастам. В частности, очевидно, что некоторую проблему составляет разграничение личинок 2-го и 3-го возрастов, тогда как для остальных таковой не возникает. На первый взгляд, более точным представляется определение возраста по ширине ротового аппарата. Для установления статистической достоверности наблюдаемых различий был использован непараметрический U-тест Манна – Уитни. Результаты расчетов показали, что статистически значимые ( $p < 0,05$ ) различия действительно имеют место для параметра ширины ротового аппарата личинок *C. ohridella* 2-го и 3-го возрастов ( $p = 0,000002$ ), длины ротового аппарата ( $p = 0,007$ ), длины головной капсулы ( $p = 0,0003$ ), как и длины головного отдела ( $p = 0,000009$ ). Таким образом, результаты статистического анализа данных морфометрических показателей (промеров) личинок 2-го и 3-го возрастов позволили выявить диагностические признаки для их разграничения.

### Заключение

По результатам анализа данных морфометрии личинок каштановой минирующей моли для установления их возраста предложено использовать показатель ширины ротового аппарата, для которого выявлены статистически значимые различия между личинками каждого возраста. Однако полученные в рамках составления детальной морфометрической характеристики личинок разных возрастов данные позволяют (в зависимости от исследовательской схемы) подобрать для идентификации возрастной принадлежности личинок *C. ohridella* те промеры, которые наиболее удобны при обеспечении должной статистической достоверности результатов. Предложенный методический подход позволяет устанавливать возрастную структуру группировок личинок каштановой минирующей моли в ходе биоэкологических исследований и мониторинга популяций данного опасного вредителя зеленых насаждений.

### Библиографический ссылки

1. Prins deW, Prins deJ. Gracillariidae (Lepidoptera). *World Catalogue of Insects*. 2005;6:1–502.
2. Šefrová H, Skuhřavý V. The larval morphology of *Cameraria ohridella* Deschka & Dimič compared with the genus *Phyllonorycter* Hübner (Lepidoptera, Gracillariidae). *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis (Brno)*. 2000;4:23–30.
3. Šefrová H. *Phyllonorycter issikii* (Kumata, 1963) – bionomics, ecological impact and spread in Europe (Lepidoptera, Gracillariidae). *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2002;50:99–104.
4. Семенченко ВП, и др. *Черная книга инвазивных видов животных Беларуси*. Минск: Беларуская навука; 2020. 163 с.
5. Drake JA, editor. *Handbook of Alien Species in Europe*. Luxembourg: Springer Netherlands; 2009. 339 p.
6. Рогинский АС, Буга СВ. Поврежденность каштана конского обыкновенного каштановой минирующей молью (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) в условиях зеленых насаждений г. Минска в осенний период. *Защита растений*. 2014;38:216–225.
7. Рогинский АС, Синчук ОВ, Сауткин ФВ, Буга СВ. Распространение и вредоносность каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič) в зеленых насаждениях Беларуси. *Труды БГУ*. 2014. Том 9, часть 2. с. 95–103.
8. Deschka G, Dimič N. *Cameraria ohridella* n. sp. aus Mazedonien, Jugoslawien (Lepidoptera, Lithocolletidae). *Acta Entomologica Jugoslavica*. 1986;22(1):11–23.
9. Dimič N, Mihajlović L, Vukća M, Perić P, Krnjajić S, Cvetković M. Development of *Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986 (Lepidoptera, Gracillariidae). *Entomofauna*. 2000;21:5–12.
10. Second report of the European community to the convention on biological diversity [Internet, cited 2024 March 04]: thematic report on alien invasive species (based on the Questionnaire provided by the CBD Secretariat). 2002. Available from: <https://www.cbd.int/doc/world/eur/eur-nr-ais-en.pdf>.
11. Zunke U, Fernandez-Nunez M, Ilmberger N, Hofmeier M, Konitz K, Doobe G. «*Cameraria ohridella*, the HAM-CAM-project 2002/03 in Hamburg». *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*. 2003;55(10):227–234: 227–234.
12. Pop D, Pop O, Cuc G., Oltean I. Studies regarding the morphology of horse chestnut leafminer's larva (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič). *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*. 1970;63(64):267–270.
13. Акимов ИА, Зерова МД, Нарольский НБ, Свиридов СВ, Коханец АМ, Никитенко ГН, Гершензон ЗС. Биология каштановой минирующей моли *Cameraria ohridella* (Lepidoptera, Gracillariidae) в Украине. *Вестник зоологии*. 2003;37(5):41–52.
14. Зерова МД, Никитенко ГН, Нарольский Н.Б, Гершензон ЗС, Свиридов СВ, Лукаш ОВ, Бабиодрич ММ. *Каштановая минирующая моль на Украине*. Киев: ТОВ «Велес»; 2007. 87 с.
15. Davis DR, Prins deJ. Systematics and biology of the new genus *Macrosaccus* with descriptions of two new species (Lepidoptera, Gracillariidae). *ZooKeys*. 2011;98:29–82.
16. Рогинский АС, Буга СВ. Краткая морфометрическая характеристика личинок каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986; Lepidoptera: Gracillariidae). *Актуальные проблемы зоологической науки в Беларуси. Сборник статей XI Зоологической Международной научно-практической конференции, 1–3 ноября 2017 г., Минск*. Минск: [б. и.]; 2017. Том 2. с. 371–374.
17. Рогинский АС. *Рекомендации по изучению биологии, экологии и вредоносности каштановой минирующей моли в рамках учебной научно-исследовательской работы студентов и школьников*. Минск: БГУ; 2020. 19 с.
18. PAST 4.15 manual [Internet, cited 2024 March 01]. Available from: <https://folk.uio.no/ohammer/past/past4manual.pdf>.
19. Мастицкий СЭ, Шитиков ВК. *Статистический анализ и визуализация данных с помощью R*. Москва: ДМК Пресс; 2015. 496 с.

## References

1. Prins deW, Prins deJ. Gracillariidae (Lepidoptera). *World Catalogue of Insects*. 2005;6:1–502.
2. Šefrová H, Skuhravý V. The larval morphology of *Cameraria ohridella* Deschka & Dimič compared with the genus *Phyllonorycter* Hübner (Lepidoptera, Gracillariidae). *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis (Brno)*. 2000;4:23–30.
3. Šefrová H. *Phyllonorycter issikii* (Kumata, 1963) – bionomics, ecological impact and spread in Europe (Lepidoptera, Gracillariidae). *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2002;50:99–104.
4. Semenchenko VP, et al. *Chernaya kniga invazivnyh vidov zivotnyh Belarusi* [The Black Book of Invasive Animals of Belarus]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2020. 163 p. Russian.
5. Drake JA, editor. *Handbook of Alien Species in Europe*. Luxemburg: Springer Netherlands; 2009. 339 p.
6. Roginsky AS, Buga SV. *Povrezhdennost' kashtana konskogo obyknovennogo kashtanovoj miniruyushchej mol'yu (Cameraria ohridella Deschka & Dimič, 1986) v usloviyah zelenyh nasazhdenij g. Minska v osennij period* [Damage of *Aesculus hippocastanum* by horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986) under the conditions of green plantations of Minsk in the autumn period]. *Zashchita rastenij*. 2014;38:216–225. Russian.
7. Roginsky AS, Sinchuk OV, Sautkin FV, Buga SV. *Rasprostranenie i vredonosnost' kashtanovoj miniruyushchej moli (Cameraria ohridella Deschka & Dimič) v zelenyh nasazhdeniyah Belarusi* [Distribution and harmfulness of horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič) in green stands of Belarus]. *Trudy BGU*. 2014;9(2):95–103. Russian.
8. Deschka G, Dimič N. *Cameraria ohridella* n. sp. aus Mazedonien, Jugoslawien (Lepidoptera, Lithocolletidae). *Acta Entomologica Jugoslavica*. 1986;22(1):11–23.
9. Dimič N, Mihajlović L, Vukća M, Perić P, Krnjajić S, Cvetković M. Development of *Cameraria ohridella* Deschka & Dimič, 1986 (Lepidoptera, Gracillariidae). *Entomofauna*. 2000;21:5–12.
10. Second report of the European community to the convention on biological diversity [Internet, cited 2024 March 04]: thematic report on alien invasive species (based on the Questionnaire provided by the CBD Secretariat). 2002. Available from: <https://www.cbd.int/doc/world/eur/eur-nr-ais-en.pdf>.
11. Zunke U, Fernandez-Nunez M, Ilmberger N, Hofmeier M, Konitz K, Doobe G. «*Cameraria ohridella*, the HAM-CAM-project 2002/03 in Hamburg». *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*. 2003;55(10):227–234: 227–234.
12. Pop D, Pop O, Cuc G., Oltean I. Studies regarding the morphology of horse chestnut leafminer's larva (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimič). *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*. 1970;63(64):267–270.
13. Akimov IA, Zerova MD, Narolskij NB, Sviridov SV, Kohanec AM, Nikitenko GN, Gershenzon ZS. *Biologiya kashtanovoj miniruyushej moli Cameraria ohridella (Lepidoptera, Gracillariidae) v Ukraine* [Biology of the chestnut mining moth *Cameraria ohridella* (Lepidoptera, Gracillariidae) in Ukraine]. *Bulletin of Zoology*. 2003;37(5):41–52. Russian.
14. Zerova MD, Nikitenko GN, Norol'skij NB, Gorshenzon ZS, Sviridov SV, Lukash OV, Babidorich MM. *Kashtanovaya miniruyushchaya mol' na Ukraine* [The horse-chestnut leaf miner in Ukraine]. Kiev: TOV «Veles»; 2007. 87 p. Russian.
15. Davis DR., Prins deJ. Systematics and biology of the new genus *Macrosaccus* with descriptions of two new species (Lepidoptera, Gracillariidae). *ZooKeys*. 2011;98:29–82.
16. Roginsky AS, Buga SV. *Kratkaya morfometricheskaya charakteristika lichinok kashtanovoj miniruyushej moli (Cameraria ohridella Deschka & Dimič, 1986; Lepidoptera: Gracillariidae)* [Brief morphometric characteristics of the larvae of the chestnut mining moth (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimich, 1986; Lepidoptera: Gracillariidae)]. In: *Actual problems of zoological science in Belarus. Collection of articles of the XI Zoological International Scientific and Practical Conference, 2017 November 1–3, , Minsk*. Minsk: [publisher unknown]; 2017. Volume 2. p. 371–374. Russian.
17. Roginsky AS. *Rekomendacii po izucheniyu biologii, ekologii i vredonosnosti kashtanovoj miniruyushej moli v ramkah uchebnoj nauchno-issledovatel'skoj raboty studentov i shkolnikov* [Recommendations for the study of biology, ecology and harmfulness of the chestnut mining moth in the framework of educational research work of students and schoolchildren]. Minsk: BGU; 2020. 19 p. Russian.
18. PAST 4.15 manual [Internet, cited 2024 March 01]. Available from: <https://folk.uio.no/ohammer/past/past4manual.pdf>.
19. Mastickij SE, Shitikov VK. *Statisticheskij analiz i vizualizaciya dannyh s pomoshyu R* [Statistical analysis and visualization of data using R]. Moscow: DMK Press; 2015. 496 p. Russian.

---

---

# РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

---

## RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

---

---

УДК 543.429.3:539.16

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА LS-SVM ДЛЯ СГЛАЖИВАНИЯ СПЕКТРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОГАБАРИТНОГО СЦИНТИЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА

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

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

Современные методы обработки спектрограмм гамма-излучения являются наиболее перспективными направлениями определения содержания радионуклидов в объектах окружающей среды. Особую проблему представляет задача выравнивания спектров при проведении измерений *in situ* из-за ограничений по времени набора и низкого отношения сигнал/шум. В настоящей работе приведена оценка эффективности использования метода регрессии на опорных векторах (LS-SVM) для сглаживания спектра, полученного с использованием сцинтиляционного NaI(Tl) детектора, в сравнении с методами скользящей средней и экспоненциального сглаживания. Оценка эффективности выравнивания спектра проводилась для всего энергетического диапазона измерения, а не только для области пика полного фотопоглощения квантов заданной энергии.

---

#### Образец цитирования:

Никитин АН, Мищенко ЕВ, Солоненко ЕВ. Экспериментальный анализ эффективности метода LS-SVM для сглаживания спектров, полученных с использованием малогабаритного сцинтиляционного детектора. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;1:32–45. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-32-45>

#### For citation:

Nikitin AN, Mischenko EV, Solonenko EV. Experimental analysis of the efficiency of gamma-ray spectrum smoothing with LS-SVM when using a compact scintillation detector. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;1:32–45. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-32-45>

---

#### Авторы:

**Александр Николаевич Никитин** – кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора по научной работе.  
**Егор Викторович Мищенко** – научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.  
**Евгения Викторовна Солоненко** – 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)  
**Evgenia V. Solonenko**, researcher at the laboratory of radioecology. [zhukvskaja.evgenija@gmail.com](mailto:zhukvskaja.evgenija@gmail.com)

Для анализа применялись полусинтетические спектры  $\gamma$ -излучения заданной продолжительности, сформированные поканальным суммированием радомизированно отобранных реальных спектров с переводом в скорость счета. Для оценки эффективности различных методов использованы полусинтетические спектры, сформированные для времени измерения 60, 300, 900, 1800, 3600, 7200 и 72000 с. Реальные спектры получены с использованием экспериментальной установки, состоящей из блока детектирования АТОМТЕХ, радионуклидного источника, компьютера со специализированным программным обеспечением и вспомогательных приспособлений. Выполненный анализ показал, что метод LS-SVM наиболее эффективен для сглаживания спектрограмм, полученных при времени измерения от  $1 \cdot 10^3$  до  $7 \cdot 10^3$  с. Отметим, что необходима раздельная оптимизация гиперпараметров модели сглаживания для трех частично перекрывающихся энергетических поддиапазонов. При более продолжительных измерениях применение испытанных методов сглаживания спектрограммы не приводит к снижению отношения сигнал/шум; при измерениях с коротким интервалом (до 100 с) наибольшей эффективностью обладает метод скользящей средней. Он позволяет повысить отношение сигнал / шум на 2–2,5 дБ. В диапазоне времени измерения  $10^2$ – $10^3$  с наиболее сильное подавление статистического шума удается добиться с помощью экспоненциального сглаживания с  $\alpha = 0,75$ .

**Ключевые слова:** гамма-спектрометрия; обработка спектра; отношение сигнал-шум, регрессия на опорных векторах.

**Благодарность.** Исследования выполнены в рамках задания 3.05 НИР 4 ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда».

## EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF GAMMA-RAY SPECTRUM SMOOTHING WITH LS-SVM WHEN USING A COMPACT SCINTILLATION DETECTOR

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

<sup>a</sup>*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus,  
4 Fiadzyuninskaya Street, Gomel 246007, Belarus*

*Corresponding author: E. V. Mischenko (egormischenko@gmail.com)*

Improving methods for processing gamma-ray spectrograms is a highly promising direction for further advancements in determining the content of radionuclides in environmental objects. A significant challenge lies in smoothing spectra during *in situ* measurements due to time constraints and low signal-to-noise ratio. This study evaluates the effectiveness of using Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM) regression for smoothing spectra obtained with a NaI(Tl) scintillation detector, comparing it with moving average and exponential smoothing methods. The evaluation of spectrum alignment effectiveness was conducted for the entire energy measurement range. Semi-synthetic gamma-ray spectra with measurement times 60, 300, 900, 1800, 3600, 7200, and 72000 seconds, generated by channel summing of randomly selected real spectra converted into count rates, were employed for analysis. Real spectra were acquired using an experimental setup consisting of an АТОМТЕХ detection unit, a radionuclide source, a computer with specialized software, and auxiliary devices. The analysis demonstrated that the LS-SVM method is most effective for smoothing spectrograms obtained at measurement times ranging from  $1 \cdot 10^3$  to  $7 \cdot 10^3$  seconds. Separate optimization of smoothing model hyperparameters is required for three partially overlapping energy subranges. For more longer measurements, applying tested spectrogram smoothing methods does not reduce the signal-to-noise ratio. For short intervals (up to 100 seconds), the moving average method exhibits the highest efficiency, allowing for a 2–2.5 dB improvement in the signal-to-noise ratio. In the measurement time range of  $10^2$ – $10^3$  seconds, the most effective suppression of statistical noise is achieved with exponential smoothing with  $\alpha = 0.75$ .

**Keywords:** gamma-spectrometry; spectrum unfolding; signal-to-noise ratio, support vector regression

**Acknowledgments.** This study was supported by the Belarussian state scientific research program «Natural Resources and Environment» (2021–2025) task 3.05.4.

### Введение

Спектрометрия гамма-излучения является мощным аналитическим методом, используемым в различных областях науки и техники для изучения свойств радиоактивных материалов и их взаимодействия с окружающей средой [1–4]. Картирование содержания радиоактивных изотопов в объектах окружающей среды с использованием полевой  $\gamma$ -спектрометрии широко используется не только для радиационного обследования территории и ликвидации радиационных аварий, но и для геологических исследований, поиска месторождений полезных ископаемых [5]. Развитию методов полевой спектрометрии способствует прогресс как в направлении приборостроения, так и в области методов обработки первичных данных.

Согласно [6], основное влияние на точность результатов  $\gamma$ -спектрометрического анализа оказывают два источника ошибок: вариабельность параметров калибровки по энергии и статистический шум.

Первая проблема решается автоматической коррекцией усиления для каждого из кристаллов. Причина второй – вероятностная природа радиоактивного распада [7]. Проявлением статистического шума в спектрограмме  $\gamma$ -излучения является отклонение скорости счета в каналах реального спектра от ожидаемой скорости счета в каналах «идеального» спектра. По мнению экспертов [5], разработка методов повышения отношения сигнал/шум (SNR) в спектрограмме остается актуальной первоочередной задачей в области  $\gamma$ -спектрометрии. В настоящее время она решается за счет увеличения общего объема кристаллов детектора, что используется преимущественно при проведении измерений с использованием средств авиации, а также за счет новых методов выравнивания спектров при их обработке.

Актуальность поиска оптимального способа снижения статистического шума в спектре  $\gamma$ -излучения при проведении полевой спектрометрии обусловлена тем, что пространственное разрешение результата обратно пропорционально количеству точек измерения или скорости перемещения детектора. На практике количество точек измерения или скорость перемещения детектора ограничиваются временем, отведенным на проведение обследования заданной площади. Сохранение пространственного разрешения за счет уменьшения времени набора спектра сопровождается ростом статистического шума в спектрограмме [5]. Наличие метода сглаживания спектрограммы без искажения информативной составляющей (снижение вклада статистического шума) позволяет минимизировать время отбора отдельного спектра, повышая тем самым эффективность проведения полевой спектрометрии [5].

Спектр  $\gamma$ -излучения представляет собой сложную структуру с различной степенью ковариации между каналами [8; 9]. Отталкиваясь от этого положения, был предложен ряд методов снижения статистического шума (выравнивания спектра). Распространенными способами решения этой проблемы являются скользящая средняя и экспоненциальная скользящая средняя, сглаживание с использованием марковских цепей, Фурье-преобразование, вейвлет-преобразование и некоторые другие методы [10–13].

Увеличение вычислительной мощности мобильных компьютеров позволяет применять методы подавления статистического шума, основанные на обработке полного спектра. В настоящее время наиболее часто используются подходы, основанные на методе главных компонент. К их числу относятся MNF [14] и NASVD [15]. Недостатки таких методов – появление аномалий в выровненных спектрах и сильная зависимость результата от количества отбираемых компонент.

Альтернативным подходом к решению проблемы уменьшения статистического шума в спектрограмме с коротким временем измерения является ее представление с позиции особого случая аппроксимации функции с использованием методов машинного обучения [16]. Решение подобных задач состоит в обучении модели в направлении минимизации выбранной функции потерь. Для сглаживания спектрограммы модель каждый раз обучается по данным измерений и должна давать на выходе спектрограмму с уменьшенным вкладом статистического шума. В этой ситуации чрезвычайно важным этапом является правильный подбор гиперпараметров сглаживающей модели. Они должны обеспечивать сохранение значимой информации, но минимизировать амплитуду случайных отклонений, то есть построенная в последующем модель должна обладать оптимальной способностью к генерализации. Оптимизация гиперпараметров может быть осуществлена с использованием скорости счета в каналах эталонного спектра в качестве истинных значений и скорости счета в каналах на выходе сглаживающей модели в качестве предсказанных значений. В качестве функции потерь здесь обосновано использование среднеквадратичной ошибки.

Для шумоподавления в стохастических системах Sun J. и Zhou Y. [16] испытан метод регрессии на опорных векторах с наименьшими квадратами (LS-SVM). Метод опорных векторов позволяет проецировать мультиразмерное пространство параметров системы со сложной нелинейной зависимостью в другое мультиразмерное пространство, где зависимость между параметрами линейна, используя для этого набор нелинейных функций трансформации [17]. Зависимость между параметрами устанавливается в линейном пространстве. Испытания, выполненные Sun J. и Zhou Y. на синтетических временных рядах, свидетельствуют, что данный подход позволяет выделить значимую информацию и существенно снизить вклад статистического шума без предварительного знания о характеристиках системы.

Впервые использовать метод регрессии на несущих векторах для сглаживания спектрограмм  $\gamma$ -излучения было предложено в 2017 г. Liu J, et al. [18]. Авторами были показаны перспективы данного метода обработки спектрограмм, получаемых при авиационной спектрометрии с использованием набора сцинтилляционных твердотельных детекторов большого объема.

Малогобаритные  $\gamma$ -спектрометрические комплексы на основе кристаллов NaI(Tl) получили широкое распространение в полевой спектрометрии. Они не требуют охлаждения, неприхотливы в обслуживании и хранении, обладают низким потреблением энергии. Современные интеллектуальные блоки детектирования на основе кристаллов NaI(Tl) включают в свой состав фотоумножитель, предусилитель, стабилизатор усиления и микроконтроллер для управления системой, формирования и хранения спектрограммы. Метод

подавления шума на основе LS-SVM не был адаптирован (не подобраны оптимальные гиперпараметры модели) для подобных блоков детектирования. Насколько известно авторам, ранее не выполнялась оценка его эффективности для малогабаритных  $\gamma$ -спектрометрических комплексов на основе кристаллов NaI(Tl). Вместе с тем решение этой задачи важно для организации полевой  $\gamma$ -спектрометрии, исследования пространственного распределения радионуклидов в почве и других объектах окружающей среды.

Целью настоящей работы явилась адаптация метода регрессии на опорных векторах для сглаживания спектра  $\gamma$ -излучения, полученного с использованием малогабаритного интеллектуального блока детектирования на основе кристалла NaI(Tl) и сравнение его эффективности с наименее требовательными к вычислительным ресурсам методами – скользящей средней и экспоненциальной скользящей средней.

Следует отметить, что в полевой  $\gamma$ -спектрометрии могут представлять интерес не только области полного фотопоглощения квантов с заданной энергией, но и другие участки спектрограммы. В частности, соотношение между площадью пика и плато используется для оценки глубины залегания «центра масс» запаса радионуклида из выпадений [19]. Поэтому целесообразно провести оценку эффективности выравнивания для спектрограммы в целом, а не отдельных ее участков.

### Материалы и методы исследования

Экспериментальные работы проведены с использованием сцинтилляционного детектора на основе кристалла NaI(Tl) размером  $\varnothing 63 \times 63$  мм ( $196,2 \text{ см}^3$ ) в составе интеллектуального блока детектирования Атомтех BDKG-07. Характеристики энергетической калибровки блока в период проведения измерений: граничная энергия – 3270 кэВ, 6,4 кэВ на один канал. Блок детектирования имеет систему встроенной светодиодной стабилизации измерительного тракта, предупреждающей дрейф по шкале энергии. При наборе спектрограмм блок детектирования без защиты располагался в закрытом помещении. На протяжении эксперимента температура в помещении составляла от 17,6 до 19,0 °С. В 0,1 м от него был размещен образцовый радионуклидный источник объемом 100 мл с удельным весом  $1,02 \text{ г/см}^3$  в геометрии  $\varnothing 70 \times 26$  мм, состав которого указан в табл. 1. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Для управления блоком детектирования и сохранения результатов измерения использовано программное обеспечение ATAS версии 3.2 (Атомтех). Набор и сохранение спектров осуществлялись в автоматическом режиме циклических измерений. Время набора каждого спектра – 15 с, количество каналов – 512. Спектрограммы сохранялись в файлы формата SPE. Всего было набрано 8700 спектров. Перед обработкой спектры приведены к скорости счета в каналах (имп./сек.).

Обработку данных выполняли в среде *iPython* с использованием библиотек для обработки данных *Pandas*, *numpy*, *scipy*. Построение моделей для выравнивания спектрограмм осуществляли с использованием библиотеки *scikit-learn*. Для построения графиков использован инструментальный *matplotlib*.

Таблица 1

Состав образцового раствора радионуклидов по состоянию на момент проведения эксперимента

Table 1

The composition of the reference solution of radionuclides at the moment of the experiment

Нуклид	Активность, Бк	Период полураспада
$^{54}\text{Mn}$	64	312,34 сут.
$^{57}\text{Co}$	25	271,79 сут.
$^{60}\text{Co}$	152	5,27 лет
$^{65}\text{Zn}$	7	244,26 сут.
$^{88}\text{Y}$	2	106,65 сут.
$^{109}\text{Cd}$	175	462,64 сут.
$^{113}\text{Sn}$	4	115 сут.
$^{137}\text{Cs}$	286	30,07 лет
$^{139}\text{Ce}$	2	137,64 сут.
$^{241}\text{Am}$	863	432,27 лет

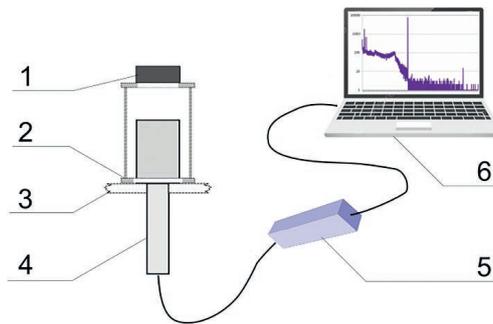


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – радионуклидный источник; 2 – штатив; 3 – опора; 4 – блок детектирования; 5 – блок сопряжения; 6 – компьютер со специализированным программным обеспечением

Fig. 1. Design of experimental set-up: 1 – radioisotope emitter; 2 – rack; 3 – support; 4 – detector unit; 5 – adapter; 6 – computer with specialized software

Для анализа использовались полусинтетические спектры  $\gamma$ -излучения заданной продолжительности ( $t$ ), сформированные методом бутстрэппинга: рандомизированной выборкой соответствующего количества ( $n$ ) 15-секундных спектров и расчета средней арифметической по каждому каналу. Данная процедура равносильна получению спектра, продолжительность набора которого равна  $15 \cdot n$  с. Обоснованность данного подхода для формирования набора спектрограмм, используемых для машинного обучения, показана в [20]. Кроме исходных спектров с временем измерения 15 с, в анализе использованы полусинтетические спектры, сформированные для времени измерения 60, 300, 900, 1800, 3600, 7200 и 72000 с. Время измерения 15, 60, 300, 900, 1800 и 3600 с было выбрано на основании опыта авторов при проведении полевой спектрометрии, как наиболее часто используемые режимы сбора данных. Выбранные значения времени измерения отражают широкий диапазон условий получения спектрограмм, позволяя получить сравнительную характеристику эффективности испытываемых методов сглаживания спектров при различных отношениях сигнал/шум. Для анализа эффективности каждого из вариантов обработки было сформировано 1000 спектров.

Спектр, полученный посредством усреднения всей выборки (суммарное время набора 36,25 ч) с последующим пересчетом на скорость счета, был условно принят за эталонный, лишенный статистического шума (рис. 2). Он использован для оценки отношения сигнал / шум полусинтетических спектров до и после выравнивания. Для оценки адекватности использованного способа формирования эталонного спектра было произведено непрерывное измерение в аналогичных условиях на протяжении 10 ч (максимальная продолжительность, доступная в программном обеспечении ATAS) с последующим пересчетом на скорость счета. Среднеквадратичное отклонение между полусинтетическим эталонным и непрерывным спектрами составило  $2,4 \cdot 10^{-6}$ , что свидетельствует о высокой степени их сходства и адекватности использованного метода для формирования полусинтетических спектров.

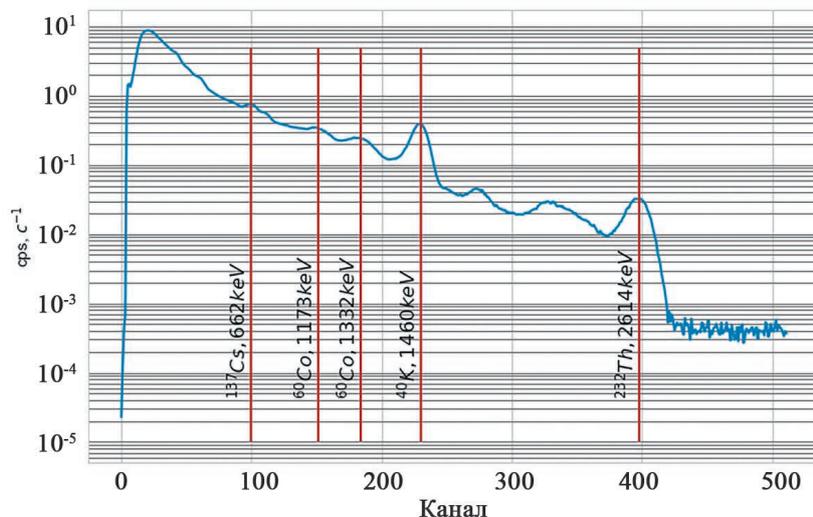


Рис. 2. Спектр  $\gamma$ -излучения, принятый за эталонный

Fig. 2. The reference  $\gamma$ -ray spectrum

Для оценки эффективности шумоподавления в спектре использовали меру ошибки L2, выражаемую в дБ:

$$SNR = -10 \log_{10} \left( \frac{\|f_0 - f\|^2}{\|f_0\|^2} \right), \quad (1)$$

где  $f_0$  – эталонный спектр,  $c^{-1}$ ;  $f$  – исходный спектр или спектр после выравнивания,  $c^{-1}$ . В данном исследовании рассматривается статистический шум во всем спектре  $\gamma$ -излучения, а под эффективностью шумоподавления подразумевается уменьшение статистического шума.

Сравнительный анализ статистического шума в спектрограмме  $\gamma$ -излучения имеет смысл для заданных условий измерений и диапазона регистрируемых энергий  $\gamma$ -квантов. Анализ полученных результатов для всего диапазона энергий детектора показывает, что отношение сигнал / шум в используемой экспериментальной установке имеет близкую к логарифмической зависимость от времени измерения (рис. 3). После  $10^4$  с измерения рост SNR начинает замедляться сильнее. При увеличении времени измерения с 15 до 300 с SNR возрастает от 9,23 до 15,71 дБ. При 1-часовом измерении SNR достигает 21,05 дБ и приближается к 27 дБ при измерении, продолжающемся 24 ч.

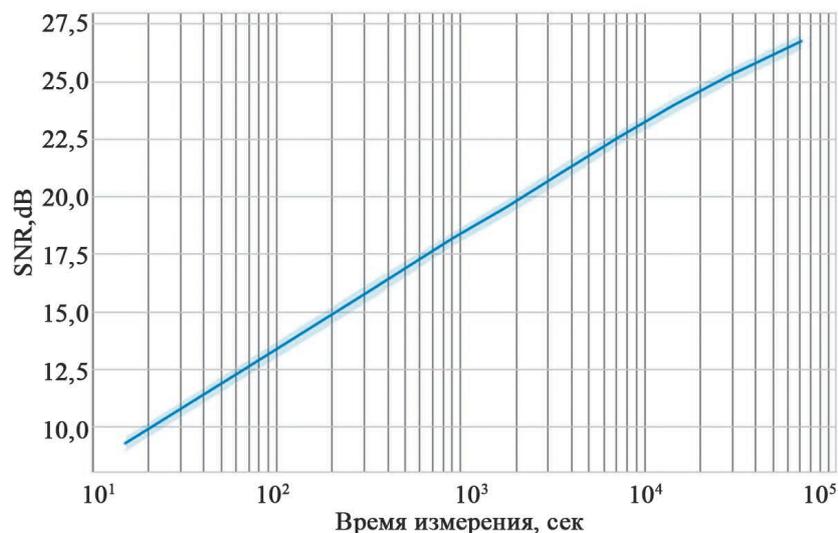


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал / шум от времени измерения.  
Область ошибок соответствует трехкратному среднеквадратичному отклонению SNR

Fig. 3. Dependence of the signal-to-noise ratio on the measurement time.  
The error region corresponds to 3-x standard deviation of the SNR

## Результаты исследования и их обсуждение

В настоящей работе использован метод регрессии на несущих векторах (LS-SVM) с ядром преобразования к линейному пространству на основе радиальной базисная функция (RBF), испытание других вариантов ядер трансформации не производилось. Данная функция позволяет получить наилучшие результаты в различных приложениях метода несущих векторов [17]. Как было отмечено выше, эффективность выравнивания при использовании аппроксимирующих функций в значительной мере зависит от гиперпараметров модели машинного обучения, поэтому их подбор является важным этапом работы. Основными гиперпараметрами модели регрессии на опорных векторах являются:  $C$  – параметр регуляризации, чем он ниже, тем больше штрафуются сложность модели;  $\gamma$  – определяет строгость отбора опорных векторов;  $\epsilon$  – расстояние от ограничивающей линии, проходящей через опорные вектора, до гиперплоскости.

Подбор гиперпараметров модели выравнивания осуществлялся методом Байесовой оптимизации. Критерием оптимизации служило максимальное значение отношения сигнал/шум. Оптимизация осуществлялась на спектрах с временем измерения 60 с. В данных условиях оптимальными параметрами оказались:  $C = 251,4$ ;  $\gamma = 0,0135$ ,  $\epsilon = 0,0239$ .

Проведенный анализ показал, что для спектров с продолжительностью набора 60 с, обработка с помощью LS-SVM повышает отношение сигнал/шум с 12,25 до 14,16 (табл. 2). Заметное улучшение данного показателя наблюдается также для наиболее коротких по продолжительности набора спектров (15 с). Для спектров с продолжительностью набора 300 с улучшение SNR незначительное. При увеличении продолжительности измерения применение метода LS-SVM вносит значительные искажение и ухудшает

результат. Следует предположить, что оптимизация гиперпараметров модели LS-SVM на спектрограммах с более продолжительным временем набора позволит несколько исправить эту ситуацию. Но наибольший интерес представляет улучшение SNR для случаев с короткой продолжительностью набора.

Таблица 2

Отношение сигнал / шум при выравнивании спектра  $\gamma$ -излучения методами LS-SVM;  
 средняя арифметическая  $\pm 3$  среднеквадратических отклонения

Table 2

Signal-to-noise ratio after  $\gamma$ -ray spectrums smoothing by LS-SVM method; arithmetic mean  $\pm 3$  standard deviation

Время измерения, с	Без выравнивания	LS-SVM	SVRw, 60 с	SVRw, 900 с
15	9,24 $\pm$ 0,36	<b>11,78 <math>\pm</math> 0,61</b>	9,76 $\pm$ 0,40	9,55 $\pm$ 0,42
60	12,25 $\pm$ 0,34	<b>14,16 <math>\pm</math> 0,54</b>	12,66 $\pm$ 0,41	12,55 $\pm$ 0,45
300	15,74 $\pm$ 0,35	<b>16,13 <math>\pm</math> 0,28</b>	16,07 $\pm$ 0,42	16,07 $\pm$ 0,40
900	18,10 $\pm$ 0,36	16,65 $\pm$ 0,15	<b>18,43 <math>\pm</math> 0,42</b>	18,42 $\pm$ 0,45
1800	19,60 $\pm$ 0,35	16,69 $\pm$ 0,12	19,83 $\pm$ 0,37	<b>19,93 <math>\pm</math> 0,47</b>
3600	21,06 $\pm$ 0,36	16,73 $\pm$ 0,07	21,16 $\pm$ 0,41	<b>21,28 <math>\pm</math> 0,40</b>
7200	22,48 $\pm$ 0,37	16,69 $\pm$ 0,06	22,30 $\pm$ 0,31	<b>22,82 <math>\pm</math> 0,41</b>
72000	<b>26,47 <math>\pm</math> 0,33</b>	16,64 $\pm$ 0,04	24,46 $\pm$ 0,13	25,33 $\pm$ 0,17

Примечание. LS-SVM – регрессия на опорных векторах с одной моделью для всего энергетического диапазона и оптимизацией гиперпараметров для времени измерения 60 с; SVRw, 60 с – LS-SVM с отдельными моделями для трех энергетических окон и оптимизацией гиперпараметров для времени измерения 60 с; SVRw, 900 с – LS-SVM с отдельными моделями для трех энергетических окон и оптимизацией гиперпараметров для времени измерения 900 с.

Notes. LS-SVM – support vector regression with one model for the entire energy range and optimization of hyperparameters for a measurement time of 60 s; SVRw, 60 s – LS-SVM with separate models for three energy windows and hyperparameter optimization for a measurement time of 60 s; SVRw, 900 s – LS-SVM R with separate models for three energy windows and hyperparameter optimization for measurement time of 900 s.

Результаты  $\gamma$ -спектрометрических измерений без использования защиты характеризуются сильно различающимися скоростями счета и дисперсией в далеко отстоящих друг от друга энергетических каналах. Liu Jun, et al. [21] пришли к выводу, что использование единой модели LS-SVM для всего энергетического диапазона в подобной ситуации не позволяет достичь желаемого результата. Подобный подход приводит к необходимости использования слишком большого количества опорных векторов и переобучению моделей. На основании анализа результатов  $\gamma$ -аэросъемки, авторами выделено три энергетических окна, в которых аппроксимация выравнивающими моделями производится отдельно. Чтобы предупредить скачки значений в области перекрытия окон, вызывающий неоправданный рост первой производной, использована специальная процедура сглаживания на заданной ширине перекрытия окон [21].

Нами выполнено испытание эффективности предложенной Liu Jun, et al. [21] трехоконной оптимизации для спектрограмм, полученных с помощью интеллектуального блока детектирования Атомтех ВДКГ-07. Подбор гиперпараметров моделей осуществлялся методом Байесовой оптимизации для времени измерения – 60 с (SVRw, 60 с) и 900 с (SVRw, 900 с). В рамках решения данной задачи также подобраны оптимальные диапазоны для каждого из трех окон и ширина их перекрытия. Оптимальные гиперпараметры моделей представлены в табл. 3.

Выполненная оценка показала, что трехоконная модель LS-SVM оптимизированная на спектрограммах с временем набора 60 с имеет преимущество перед единой моделью только на спектрограммах с временем измерения более 900 с (см. табл. 2). При этом, начиная с времени измерения 1800 с и более, ее использование приводит лишь к минимальному улучшению SNR, а с 7200 с и более – ухудшает данный показатель.

Примеры выравнивания спектрограмм с использованием трехоконной модели LS-SVM, оптимизированной на время измерения 60 с, приведены на рис. 4. Модель позволяет в значительной мере сгладить спектрограмму, приблизив скорость счета в каналах к эталонным значениям. При этом на ней могут возникать небольшие артефакты, наиболее заметные при коротком времени измерения. Выровненная

спектрограмма с временем измерения 900 с мало отличаются от эталонной, при этом на реальной спектрограмме статистический шум хорошо заметен.

Таблица 3

Гиперпараметры моделей регрессии на опорных векторах для выравнивания спектров  $\gamma$ -излучения, полученных на детекторе NaI(Tl). Индекс при параметре обозначает принадлежность к модели соответствующего окна

Table 3

Hyperparameters of the Support Vector Regression Models for smoothing  $\gamma$ -ray spectrum from the NaI(Tl) detector. The index at the parameter indicates the belonging to the model of the corresponding window

Параметр	SVRw, 60 с	SVRw, 900 с
$C_1$	16,7	300,0
$C_2$	302,9	15,4
$C_3$	234,8	186,8
$\epsilon_1$	$3,17 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$
$\epsilon_2$	$6,131 \cdot 10^{-4}$	$8,988 \cdot 10^{-3}$
$\epsilon_3$	$5,27 \cdot 10^{-3}$	$3,71 \cdot 10^{-4}$
$\gamma_1$	0,429	0,773
$\gamma_2$	$3,65 \cdot 10^{-3}$	$1,80 \cdot 10^{-2}$
$\gamma_3$	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$3,62 \cdot 10^{-2}$
Ширина перекрытия окон	6	8
Граница между окнами 1 и 2 (w1)	22	27
Граница между окнами 2 и 3 (w2)	299	270
Ядро	RBF	RBF

Оптимизация гиперпараметров трехоконной модели LS-SVM на спектрограммах с временем измерения 900 с демонстрирует некоторое улучшение отношения сигнал/шум при времени измерения 1800–7200 с. При менее продолжительном измерении она уступает единой модели LS-SVM и трехоконной модели LS-SVM с оптимизацией на спектрограммах с временем измерения 60 с.

При времени измерения 72000 с ни один из испытанных методов не позволят улучшить показатель SNR, демонстрируемый на реальной спектрограмме без обработки.

Некоторые примеры выравнивания спектрограммы с использованием трехоконной модели LS-SVM с оптимизацией на спектрограммах с временем измерения 900 с представлены на рис. 5. Появление артефактов на спектрограммах с временем измерения 15 и 60 с для этой модели более характерно чем для предыдущей. Но при времени измерения 900 с скорость счета в каналах выровненной спектрограммы мало отличается от эталонных значений.

Использование моделей LS-SVM для выравнивания спектрограмм требует предварительной оптимизации гиперпараметров и обработки с использованием производительного процессора. Вместе с тем в практике  $\gamma$ -спектрометрии широкое применение имеет использование более простых методов выравнивания спектрограмм. Наиболее простым методом является скользящая средняя. Данная функция реализована в большинстве программных пакетов для обработки спектров. Единственным параметром данного фильтра является ширина фильтра (окна усреднения). Результаты анализа показали (табл. 4), что, с точки зрения увеличения отношения сигнал / шум, данный прием оказывается эффективным лишь при коротком времени измерения (15–300 с). При времени измерения 900 с улучшение SNR по сравнению с необработанной спектрограммой незначительное, а при более продолжительных измерениях SNR после обработки методом скользящей средней ухудшается. Применение скользящей средней к спектрам, набранным за 15 с, позволяет достичь уровня SNR, характерного для 60-секундных измерений. Существенным недостатком скользящей средней является уширение пиков на спектре, что означает снижение разрешения. Данное явление отчетливо проявляется при продолжительности времени измерения более 5–15 мин. В этой ситуации применение скользящей средней снижает SNR, что делает использование данного фильтра не только бесполезным, но и ухудшающим качество результата.

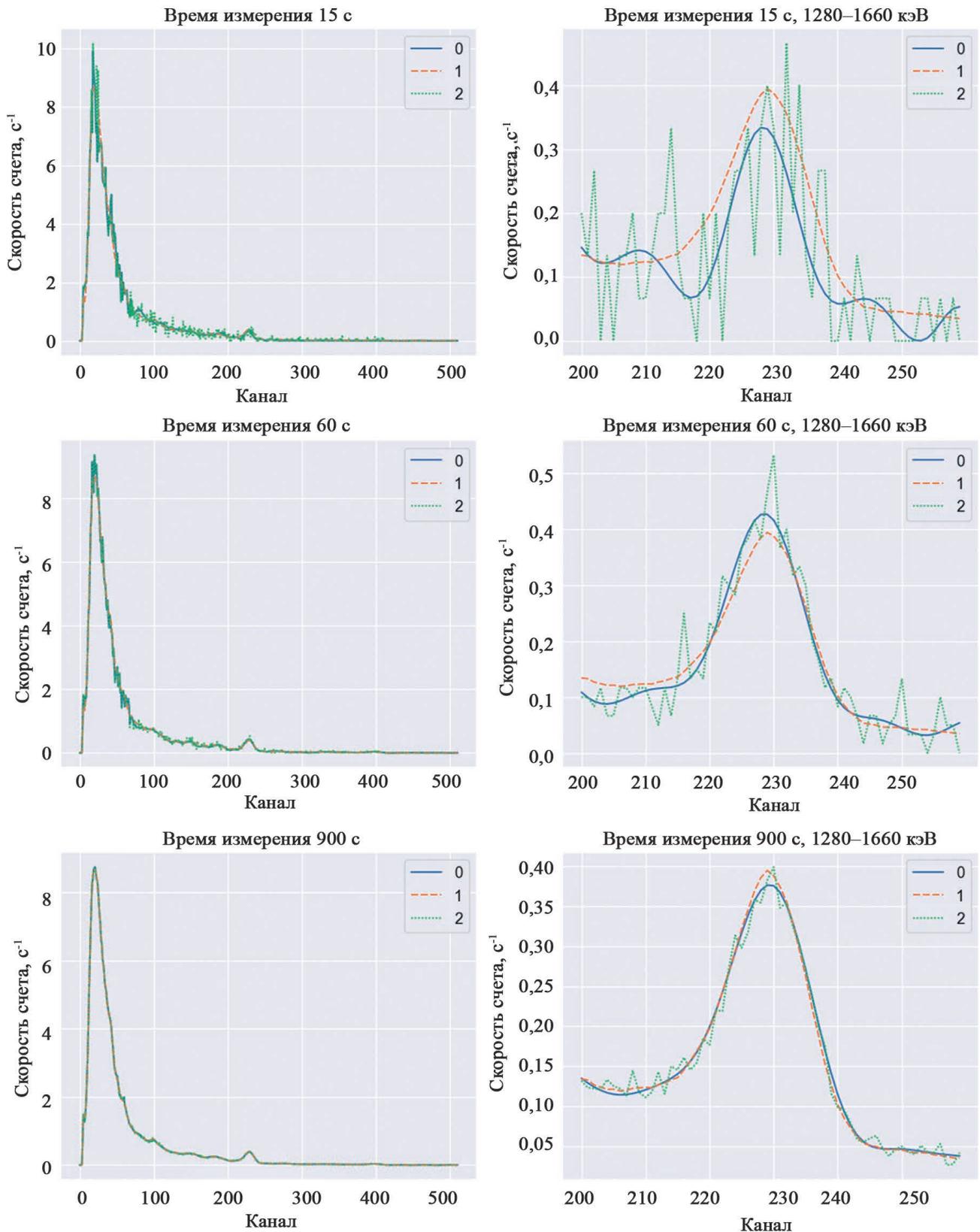


Рис. 4. Пример выравнивания спектра с использованием трехконной модели LS-SVM с оптимизацией гиперпараметров на спектрограммах с временем измерения 60 с: 0 – спектрограмма после выравнивания; 1 – эталонная спектрограмма; 2 – исходная реальная спектрограмма

Fig. 4. Examples of spectrograms smoothing using the three-window LS-SVM model with hyperparameters optimized on spectrograms with a measurement time of 60 s: 0 – spectrogram after alignment; 1 – reference spectrogram; 2 – original real spectrogram

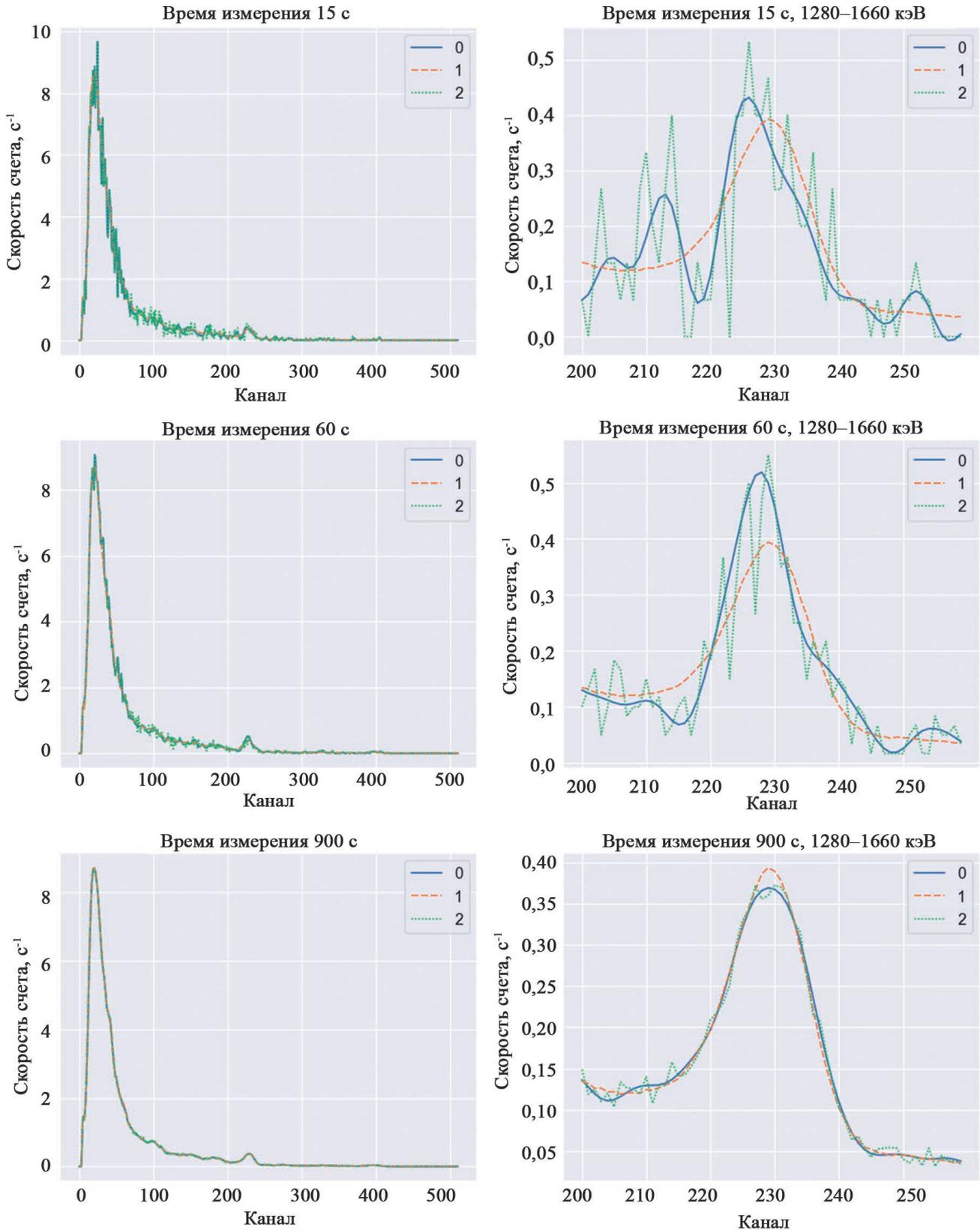


Рис. 5. Пример выравнивания спектра с использованием трехоконной модели LS-SVM с оптимизацией гиперпараметров на спектрограммах с временем измерения 900 с: 0 – спектрограмма после выравнивания; 1 – эталонная спектрограмма; 2 – исходная реальная спектрограмма

Fig. 5. Examples of spectrograms smoothing using the three-window LS-SVM model with hyperparameters optimized on spectrograms with a measurement time of 900 s: 0 – spectrogram after alignment; 1 – reference spectrogram; 2 – original real spectrogram

Отношение сигнал / шум при выравнивании спектра  $\gamma$ -излучения методом скользящей средней; средняя арифметическая  $\pm 3$  среднеквадратических отклонения,  $l$  – ширина фильтра, канал

Table 4

Signal-to-noise ratio after  $\gamma$ -ray spectrum smoothing by the moving average method; arithmetic mean  $\pm 3$  standard deviation;  $l$  is the filter width, channel

Время измерения, с	Без выравнивания	$l = 3$	$l = 5$	$l = 7$	$l = 9$
15	9,24 $\pm$ 0,36	11,58 $\pm$ 0,48	12,39 $\pm$ 0,58	<b>12,51 <math>\pm</math> 0,61</b>	12,20 $\pm$ 0,62
60	12,25 $\pm$ 0,34	14,44 $\pm$ 0,48	<b>14,61 <math>\pm</math> 0,46</b>	13,93 $\pm$ 0,46	12,93 $\pm$ 0,41
300	15,74 $\pm$ 0,35	<b>17,24 <math>\pm</math> 0,39</b>	15,94 $\pm$ 0,30	14,48 $\pm$ 0,25	13,17 $\pm$ 0,20
900	18,10 $\pm$ 0,36	<b>18,53 <math>\pm</math> 0,30</b>	16,29 $\pm$ 0,19	14,61 $\pm$ 0,16	13,21 $\pm$ 0,11
1800	<b>19,60 <math>\pm</math> 0,35</b>	18,99 $\pm$ 0,24	16,38 $\pm$ 0,14	14,62 $\pm$ 0,11	13,23 $\pm$ 0,08
3600	<b>21,06 <math>\pm</math> 0,36</b>	19,28 $\pm$ 0,17	16,44 $\pm$ 0,10	14,64 $\pm$ 0,08	13,23 $\pm$ 0,06
7200	<b>22,48 <math>\pm</math> 0,37</b>	19,45 $\pm$ 0,13	16,46 $\pm$ 0,07	14,65 $\pm$ 0,05	13,23 $\pm$ 0,04
72000	<b>26,47 <math>\pm</math> 0,33</b>	19,61 $\pm$ 0,04	16,48 $\pm$ 0,02	14,65 $\pm$ 0,02	13,24 $\pm$ 0,01

Наиболее эффективная ширина фильтра скользящей средней снижается с 7 до 3 при увеличении времени измерения с 15 до 300 с. Обращает на себя внимание тот факт, что при использовании скользящей средней SNR при росте времени измерения увеличивается до определенного предела, после чего остается практически неизменным. Максимальное значение SNR уменьшается при увеличении ширины фильтра скользящей средней.

По сравнению со скользящей средней, единая для всего спектра модель LS-SVM не дает никаких преимуществ и ее использование не может быть оправдано. Трехоконная модель LS-SVM, оптимизированная на спектрограммах с временем измерения 900 с, демонстрирует более высокое качество выравнивания по сравнению со скользящей средней на спектрограммах с временем измерения 1800–7200 с.

Экспоненциальное сглаживание является нелинейным фильтром, представляющим собой скользящую среднюю с весами, экспоненциально убывающими при удалении от центра фильтра. Сила сглаживания определяется параметром  $\alpha$ . Теоретическим преимуществом экспоненциального сглаживания перед скользящей средней является то, что оно должно меньше исказить форму пиков и не так сильно ухудшать разрешение.

В табл. 5 представлена оценка качества сглаживания спектра  $\gamma$ -излучения с  $\alpha$  равной 0,25, 0,5 и 0,75 при ширине фильтра равной 5 каналам.

Существенное увеличение показателя SNR относительно необработанной спектрограммы достигается при использовании экспоненциального фильтра с  $\alpha = 0,25$  при времени измерения 15 и 60 с, а при использовании экспоненциального фильтра с  $\alpha = 0,75$  – при времени измерения 300 с. Экспоненциальный фильтр имеет незначительные преимущества по сравнению со скользящей средней при времени измерения 60 ( $\alpha = 0,25$ ), 900 ( $\alpha = 0,75$ ) и 1800 ( $\alpha = 0,75$ ) с. При времени измерения 15 с сохраняется преимущество скользящей средней с шириной окна равной 7 каналам.

Как и в случае со скользящей средней, трехоконная модель LS-SVM превосходит экспоненциальный фильтр при времени измерения 1800, 3600 и 7200 с. При продолжительности измерений 72000 с ни один из испытанных методов сглаживания спектра не улучшает SNR.

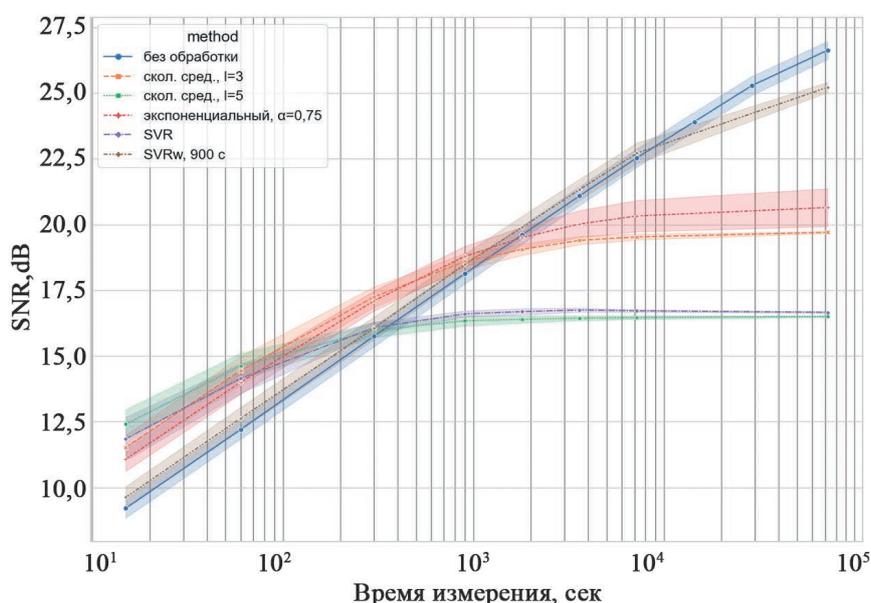
Дополнительно проведен более подробный анализ зависимости эффективности выравнивания спектров  $\gamma$ -излучения с помощью испытываемых методов от продолжительности измерения (рис. 6). Полученные результаты показывают, что испытанные методы подавления статистического шума в спектре  $\gamma$ -излучения позволяют улучшить SNR при времени измерения до  $10^4$  с. При более продолжительных измерениях испытанные методы ухудшают SNR. Наиболее сильное улучшение отношения сигнал / шум достигается при непродолжительном времени измерения  $1-5 \cdot 10^2$  с.

Отношение сигнал / шум при выравнивании спектра  $\gamma$ -излучения с помощью экспоненциального фильтра шириной 5 каналов с различным параметром  $\alpha$

Table 5

Signal-to-noise ratio after  $\gamma$ -ray spectrum smoothing using an exponential filter with width of 5 channels and different parameter  $\alpha$

Время измерения, с	Без выравнивания	$\alpha = 0,25$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,75$
15	9,24 ± 0,36	<b>12,41 ± 0,59</b>	12,08 ± 0,53	11,05 ± 0,42
60	12,25 ± 0,34	<b>14,82 ± 0,51</b>	14,74 ± 0,50	13,97 ± 0,43
300	15,74 ± 0,35	16,47 ± 0,34	17,05 ± 0,38	<b>17,16 ± 0,39</b>
900	18,10 ± 0,36	16,92 ± 0,22	17,84 ± 0,29	<b>18,90 ± 0,32</b>
1800	19,60 ± 0,35	17,06 ± 0,16	18,11 ± 0,21	<b>19,67 ± 0,30</b>
3600	<b>21,06 ± 0,36</b>	17,12 ± 0,12	18,25 ± 0,16	20,19 ± 0,24
7200	<b>22,48 ± 0,37</b>	17,16 ± 0,08	18,34 ± 0,11	20,51 ± 0,19
72000	<b>26,47 ± 0,33</b>	17,20 ± 0,03	18,41 ± 0,04	20,86 ± 0,07



Примечание. Условные обозначения: SVR – регрессия на опорных векторах – с одной моделью для всего энергетического диапазона и оптимизацией гиперпараметров для времени измерения 60 с; SVRw 900 с – LS-SVM с отдельными моделями для трех энергетических окон и оптимизацией гиперпараметров для времени измерения 900 с.

Note. Conventional designations: SVR – Support Vector Regression – with a single model for the entire energy range and hyperparameter optimization for a measurement time of 60 seconds; SVRw 900 c – LS-SVM with separate models for three energy windows and hyperparameter optimization for a measurement time of 900 seconds.

Рис. 6. Эффективность скользящей средней и регрессии на опорных векторах для выравнивания спектров  $\gamma$ -излучения при различной продолжительности измерения

Fig. 6. Efficiency of the moving average and support vector regression methods for smoothing  $\gamma$ -ray spectra at different measurement durations

Эффективность каждого из испытанных методов сильно зависит от времени измерения. При кратковременных измерениях (до 100 с) наиболее эффективным методом (среди испытанных) оказалась скользящая

средняя с окном равным пяти каналам. Эта техника увеличивает отношение сигнал / шум на 2–2,5 дБ. Немногим менее эффективна единая для всего энергетического диапазона модель LS-SVM. Использование этих методов теряет смысл при времени измерения более 200–250 с.

В диапазоне времени измерения  $10^2$ – $10^3$  с наиболее сильное подавление статистического шума удается добиться с помощью экспоненциального сглаживания с  $\alpha = 0,75$ . Отношение сигнал / шум увеличивается до 2 дБ. Близкую эффективность в этом диапазоне имеет метод скользящей средней с  $l = 3$ . Он начинает превосходить сглаживающий фильтр с  $l = 5$  при времени измерения 80 с и уступает экспоненциальному сглаживанию с  $\alpha = 0,75$  при продолжительности измерения более 300 с. Трехконная регрессия на опорных векторах имеет заметно более низкую эффективность по сравнению с экспоненциальным сглаживанием в рассматриваемом интервале времени измерения.

При времени измерения выше  $10^3$  с полностью исчерпываются возможности шумоподавления с использованием экспоненциального сглаживания, скользящей средней и регрессии на опорных векторах с единой моделью для всего энергетического диапазона. Вместе с тем для времени измерения  $1$ – $7 \cdot 10^3$  эффективным оказывается шумоподавление с помощью трехконной регрессии на опорных векторах, оптимизированной для времени измерения 900 с. Поскольку отношение сигнал/шум в необработанном спектре для этого интервала времени измерения составляет 18–22 дБ, эффективность шумоподавления относительно невысокая. Отношение сигнал/шум повышается до 1 дБ.

### Заключение

Результаты сравнительного анализа эффективности метода регрессии на несущих векторах (LS-SVM) для подавления статистического шума в спектре  $\gamma$ -излучения, полученном с использованием малогабаритного сцинтилляционного детектора NaI(Tl), показал обоснованность его использования в случае времени измерения  $1$ – $7 \cdot 10^3$  с. При этом необходима раздельная оптимизация гиперпараметров модели LS-SVM для трех частично перекрывающихся энергетических поддиапазонов с использованием спектрограмм с временем измерения около 900 с.

При времени измерения  $7 \cdot 10^3$  с LS-SVM ухудшает отношение сигнал/шум. При времени измерения менее  $1 \cdot 10^3$  с скользящая средняя и экспоненциальный фильтр демонстрируют более высокую эффективность по сравнению с LS-SVM.

Таким образом, можно рекомендовать использование LS-SVM с оптимизацией гиперпараметров модели для трех частично перекрывающихся энергетических поддиапазонов для обработки спектрограмм, полученных с использованием малогабаритного сцинтилляционного детектора NaI(Tl), при времени измерения в пределах  $1$ – $7 \cdot 10^3$  с.

### Библиографические ссылки / References

1. Rouze G, Morgana C, McBratney A. Understanding the utility of aerial gamma radiometrics for mapping soil properties through proximal gamma surveys. *Geoderma*. 2017;289:185–195. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.12.004.
2. Maacha L, Jaffal M, Jarni A. A contribution of airborne magnetic, gamma ray spectrometric data in understanding the structure of the Central Jebilet Hercynian massif and implications for mining. *Journal of African Earth Sciences*. 2017;134:389–403. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2017.07.012.
3. Söderström M, Eriksson J. Gamma-ray spectrometry and geological maps as tools for cadmium risk assessment in arable soils. *Geoderma*. 2013;192:323–334. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.07.014.
4. Khan H, Chaudhry Z, Ismail MK. Assessment of Radionuclides, Trace Metals and Radionuclide Transfer from Soil to Food of Jhangar Valley (Pakistan) Using Gamma-Ray Spectrometry. *Water Air Soil Pollution*. 2010;213:353–362. DOI: 10.1007/s11270-010-0390-4.
5. International atomic energy agency. Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data, IAEA-TECDOC-1363. Vienna: IAEA; 2003. 184 p.
6. Blackburn JA. Statistical noise and spectral analysis. *Nuclear Instruments and Methods*. 1968;63(1):66–70. DOI: 10.1016/0029-554X(68)90302-9.
7. Minty B, Hovgaard J. Spectral methods for reducing noise in gamma-ray spectrometry. *ASEG Extended Abstracts*. 2001;4:1–4. DOI: 10.1071/ASEG2001ab089.
8. 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;521:270–279. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.03.131.
9. Dragović S, Onjia A. Classification of soil samples according to their geographic origin using gamma-ray spectrometry and principal component analysis. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;89(2):150–158. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2006.05.002.
10. Zhu MH, Liu LG, Qi DX, You Z, Xu AA. Smoothing noisy spectroscopic data with many-knot spline method. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2008;589:484–486. DOI: 10.1016/j.nima.2008.03.008.
11. Tirosh S, Van De Ville D, Unser M. Polyharmonic smoothing splines and the multidimensional Wiener filtering of fractal-like signals. *IEEE Trans Image Process*. 2006;15 (9):2616–2630. DOI: 10.1109/tip.2006.877390.
12. Claeskens G, Carroll RJ. Automatic estimation of multivariate spectra via smoothing splines. *Biometrika*. 2007;94(2):335–345. DOI: 10.1093/biomet/asm022.

13. Fan CL, Pang MY. Reconstructing smooth curve from noise sampled data. Proceedings. The 2009 International Workshop on Information Security and Application (IWISA 2009). [Place unknown]: Academy Publisher; 2009. p. 218–222.
14. J. B. Lee, A. S. Woodyatt and M. Berman. Enhancement of high spectral resolution remote-sensing data by a noise-adjusted principal components transform. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1990;28(3):295–304. DOI: 10.1109/36.54356.
15. Hovgaard J. A new processing technique for airborne gamma-ray spectrometer data (Noise adjusted singular value decomposition). Sixth topical meeting on Emergency Preparedness and Response. San Francisco: American Nuclear Society; 1997. p. 123–127.
16. Jiancheng S, Chongxun Z, Yatong Z. Nonlinear Noise Reduction of Chaotic Time Series Based on Multidimensional Recurrent LS-SVM. *Neurocomputing*. 2008;71(16–18):3675–3679. DOI: 10.1016/j.neucom.2008.02.006.
17. Zhang F, O'Donnell LJ. Support vector regression. *Machine Learning. Academic Press*. 2020;12:123–140. DOI: 10.1016/B978-0-12-815739-8.00007-9.
18. Liu J, Guan X, et al. Airborne  $\gamma$  spectrum analysis based on LS-SVM segmented noise reduction method. *Nuclear Electronics and Detection Technology*. 2017;37(1):24–28.
19. Varley A, Tyler A, Dowdall M, Bondar Y, Zabrotski V. An in situ method for the high resolution mapping of  $^{137}\text{Cs}$  and estimation of vertical depth penetration in a highly contaminated environment. *Science of the Total Environment*. 2017;605–606:957–966. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.067.
20. Kim J, Lim KT, Kim J, Kim C, Jeon B, Park K, Kim G. 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.
21. Ying C, Jun L, Lei C. Aeronautical  $\gamma$  spectrum noise reduction method based on LS-SVM segmentation regression. *Journal of Physics*. 2019;2:022141. DOI: 10.1088/1742-6596/1237/2/022141.

Статья поступила в редколлегию 28.03.2023.  
Received by editorial board 28.03.2023.

УДК 535.231.16:614.876

## МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ИНДИВИДУАЛИЗИРОВАННЫХ ДОЗ ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЛИЦ, ПРОЖИВАЮЩИХ НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ РАДИОНУКЛИДАМИ ТЕРРИТОРИИ ВСЛЕДСТВИЕ АВАРИИ НА ЧАЭС

Д. Б. КУЛИКОВИЧ<sup>1),2)</sup>, Н. Г. ВЛАСОВА<sup>3)</sup>, Ю. В. ВИСЕНБЕРГ<sup>1)</sup>, Б. К. КУЗНЕЦОВ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Гомельский государственный медицинский университет,  
ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Беларусь

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

<sup>3)</sup>Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека,  
ул. Ильича, 290, 246040, Гомель, Беларусь

Оценка индивидуальных / индивидуализированных накопленных доз облучения необходима для решения задач по установлению зависимости «доза – эффект» и оценки радиационного риска, выявления наиболее облучаемых групп населения с целью оказания им адресной медицинской помощи. Надежная информация о дозах внешнего облучения населения может быть получена на основе данных индивидуального дозиметрического контроля, но применение этого метода на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению, является довольно трудоемкой задачей. При недостатке или отсутствии этих данных корректная оценка накопленной дозы может быть выполнена на основании прогнозных оценок по методическим рекомендациям, однако существующие методы оценки индивидуализированных доз облучения сверхконсервативны, поскольку они позволяют рассчитать только среднегрупповые (средневозрастные) дозы облучения. Данные методы не соответствуют задаче индивидуализации доз. Это определяет актуальность разработки адекватного методического подхода оценки индивидуализированных накопленных с момента аварии доз внешнего облучения. Исследовательская выборка была сформирована из имеющихся данных индивидуального дозиметрического контроля жителей Гомельской обл. за 1988–1995 гг. В результате проведенного исследования статистически обоснованы положения, вносящие вклад в расширение представлений о закономерностях формирования доз внешнего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях. Установлена зависимость индивидуальных доз внешнего облучения от демографических и социальных характеристик индивида. Разработан метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения, основа которого – статистическая модель множественной линейной регрессии. Целевой фактор модели – индивидуальная годовая доза внешнего облучения; объясняющие факторы – плотность загрязнения территории населенного пункта по <sup>137</sup>Cs, профессиональная занятость и демографические характеристики индивида. По результатам верификации модели ошибка оценки составила ~10 %, при этом позволяя учесть косвенный фактор – профессиональную занятость индивида.

### Образец цитирования:

Куликович ДБ, Власова НГ, Висенберг ЮВ, Кузнецов БК. Метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории вследствие аварии на ЧАЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;1:46–57.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-46-57>

### For citation:

Kulikovich DB, Vlasova NG, Visenberg YuV, Kuznetsov BK. Method for reconstructing individualized external exposure dose of persons living in a contaminated area with radionuclides as a result of the Chernobyl accident. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;1:46–57. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-46-57>

### Авторы:

**Дмитрий Борисович Куликович** – старший преподаватель кафедры медицинской и биологической физики<sup>1)</sup>; аспирант кафедры экологической медицины и радиобиологии<sup>2)</sup>.

**Наталья Генриховна Власова** – доктор биологических наук, профессор; заведующий лабораторией радиационной защиты.

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

**Борис Куприянович Кузнецов** – кандидат биологических наук, доцент; заведующий кафедрой медицинской и биологической физики.

### Authors:

**Dmitry B. Kulikovich**, senior lecturer at the department of medical and biological physics<sup>a</sup>; postgraduate student of the department of environmental medicine and radiobiology<sup>b</sup>.

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

**Natalie G. Vlasova**, doctor of science (biology), full professor; head of the department of the radiation protection laboratory.

[natalie\\_vlasova@mail.ru](mailto:natalie_vlasova@mail.ru)

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

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

**Boris K. Kuznetsov**, PhD (biology), docent; head of the department medical and biological physics.

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

Разработанный метод позволяет с высокой точностью рассчитать индивидуализированные годовые дозы внешнего облучения при недостатке или отсутствии данных индивидуального дозиметрического контроля. Рассчитанные таким образом индивидуализированные накопленные дозы внешнего облучения, наряду с индивидуализированными накопленными дозами внутреннего облучения, будут использованы в радиационно-эпидемиологических исследованиях для установления зависимости «доза – эффект» и оценки радиационных рисков.

**Ключевые слова:** доза внешнего облучения; индивидуальный дозиметрический контроль; индивидуализированная доза; информативный фактор-признак; группа профессиональной занятости.

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках НИР по теме «Разработать и внедрить метод оценки и прогноза индивидуализированных накопленных доз облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС и проживающих на радиоактивно загрязненной территории» Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 гг. Республики Беларусь, регистрационный № 20240256.

## METHOD FOR RECONSTRUCTING INDIVIDUALIZED EXTERNAL EXPOSURE DOSE OF PERSONS LIVING IN A CONTAMINATED AREA WITH RADIONUCLIDES AS A RESULT OF THE CHERNOBYL ACCIDENT

D. B. KULIKOVICH<sup>a, b</sup>, N. G. VLASOVA<sup>c</sup>, Yu. V. VISENBERG<sup>a</sup>, B. K. KUZNETSOV<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Gomel State Medical University,

5 Lange Street, Gomel 246000, Belarus

<sup>b</sup>International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,

23/1 Daïhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

<sup>c</sup>Republican Research Center for Radiation Medicine and Human Ecology,

290 Il'icha Street, Gomel 246040, Belarus

Corresponding author: D. B. Kulikovich (dimaproud@mail.ru)

Dose (individual / individualized) assessment is necessary to solve problems of establishing the «dose – effect» relationship and assessing radiation risk, recognizing the most exposed groups of the population in order to provide them medical care. Reliable information on external exposure doses to the population can be obtained on the basis of individual dosimetric control data, however, the use of this method in areas subject to radioactive contamination is a rather labor-intensive problem. If this data is insufficient or no, a correct assessment of the accumulated dose can be made on the basis of forecast estimates according to guidelines; however, existing guidelines for assessing individualized external exposure doses are over-conservative: at best, they allow the calculation of average group (average age) exposure doses. These methods don't in any way correspond to the task of dose individualization. This determines the relevance of developing an adequate methodological approach to assessing individualized external exposure doses accumulated since the Chernobyl accident. The research sample was formed on the basis of the individual dosimetric control data of residents of the Gomel region for the period from 1988 to 1995. As a result of the research, provisions were statistically substantiated that contribute to expanding the understanding of the patterns of formation of external exposure doses for the population living in contaminated areas with radionuclides. The dependence of individual external exposure doses on the demographic and social characteristics of the individual has been established. A method of reconstruction of individualized external exposure doses has been developed, the basis of which is a statistical model of multiple linear regression. The target factor of the model is the individual annual external exposure dose; explanatory factors are: the contamination density with <sup>137</sup>Cs of the territory of a populated area, occupational employment and demographic characteristics of the individual. The model was verified using a generated control sample. The estimation error was ~10 %. But additionally takes into account the indirect factor – the individual's occupational employment. The developed method makes it possible to calculate with high accuracy individualized annual external exposure doses in the lack of individual dosimetry control data. The individualized accumulated external exposure doses of calculated in this way, along with the individualized accumulated internal exposure doses, will be used in radiation epidemiological researches to establish the «dose – effect» relationship and assess radiation risks.

**Keywords:** external exposure dose; individual dosimetric control; individualized dose; informative factor-sign; occupational group; regression model.

**Acknowledgments.** The work was carried out within the framework of research work on the topic «Development and implementation of a method for assessing and predicting individualized accumulated radiation doses of persons exposed to radiation as a result of the Chernobyl accident and living in a radioactively contaminated area» of the State program for eliminating the consequences of the disaster at the Chernobyl accident at 2021–2025 Republic of Belarus, No. 20240256.

## Введение

Неотъемлемой составляющей для проведения радиационно-эпидемиологических исследований по установлению зависимости «доза – эффект» являются индивидуальные накопленные с момента аварии на ЧАЭС дозы облучения [1; 2], оценка которых – одна из наиболее актуальных и сложных проблем дозиметрии и радиобиологии, которая может быть решена путем исследования закономерностей формирования индивидуальных доз облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненной территории.

Доза внешнего облучения жителей населенного пункта непосредственно определяется прямым фактором дозообразования: уровнем плотности загрязнения территории в ареале населенного пункта, кроме того, индивидуальная доза внешнего облучения зависит от косвенных факторов: социально-демографических характеристик жителей [3].

Следовательно, ведущим фактором дозоформирования является сам человек: его личностные характеристики, гендерная принадлежность, возраст, сфера занятости, уровень образования, которые непосредственно определяют его поведение в социуме [3; 4]. Таким образом, индивидуальная доза внешнего облучения зависит не только от плотности загрязнения радионуклидами территории проживания и жизнедеятельности индивида, но и от его социально-обусловленного поведения [5–7].

Надежная информация о дозах внешнего облучения населения может быть получена на основе данных индивидуального дозиметрического контроля (далее – ИДК), однако применение этого метода на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению, является довольно трудоемкой задачей, требующей значительных финансовых, физических и временных затрат. Как следствие, сформированные базы данных ИДК носят ограниченный характер, которых недостаточно для проведения радиационно-эпидемиологических исследований [8–10]. С другой стороны, применение существующих методик оценки индивидуализированных доз внешнего облучения не целесообразно, поскольку они сверхконсервативны и не соответствуют задаче индивидуализации доз облучения, так как в их основе лежат прямые дозообразующие факторы, которые представлены в виде усредненных констант, и только для наиболее облучаемых групп населения<sup>1-4</sup>.

Полученные эмпирическим путем, эти параметры имеют большой разброс, так как усредняют широкий спектр факторов, формирующих дозу облучения, встречающихся в реальной жизни, что приводит к большой неопределенности оценок [11; 12].

Метод реконструкции индивидуализированных накопленных доз облучения (в части доз внешнего облучения)<sup>5</sup> – более прогрессивен по отношению к предыдущим методам, при этом ошибка оценки достаточно высока, и в тоже время в нем не учтен косвенный фактор – профессиональная занятость, отсюда вышеизложенное определяет актуальность разработки нового метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения.

Цель исследования: разработать метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения на основе выявленных закономерностей дозоформирования у лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории.

## Материалы и методы исследования

Данные об инструментально полученных индивидуальных дозах внешнего облучения более 35 000 жителей Гомельской обл. (представительность обследованных лиц по гендерному признаку приблизительно одинаковая) явились основой нашего исследования методом ИДК («База данных индивидуального дозиметрического контроля жителей Гомельской обл. Беларуси», регистрационное свидетельство № 5871404082 от 10.06.2014); «База данных плотности загрязнения территории населенных пунктов

<sup>1</sup>МУ 2.6.1.2004-05. Реконструкция средней (индивидуализированной) накопленной эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году (Дополнение 2 к МУ 2.6.1.579-96). Москва, 2005. 11 с

<sup>2</sup>МУ 2.6.1.579-96. Реконструкция средней накопленной в 1986–2001 гг. эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году. Москва, 1996. 8 с.

<sup>3</sup>Методические указания. Определение годовой суммарной эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов РБ, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Минск, 1996. 12 с.

<sup>4</sup>Методические указания. Оценка эффективной дозы внешнего и внутреннего облучения лиц, которые проживают на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС. Минск, 2003. 14 с.

<sup>5</sup>Метод реконструкции индивидуализированных накопленных доз облучения включенных в Государственный регистр лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий: инструкция по применению, утвержденная Министерством здравоохранения Республики Беларусь 12 декабря 2014 г., № 095-0914. Гомель, 2014. 9 с.

Республики Беларусь радионуклидами цезия, стронция и плутония по состоянию на 1986 год», регистрационное свидетельство № 58709000639 от 20.05.2009.

ИДК был проведен методом термолюминесцентной дозиметрии (ТЛ-измерения) на основе А1 О (ТЛД-500) по метрологически аттестованной методике измерений индивидуальных доз<sup>6</sup> сотрудниками Гомельского областного центра гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья, а также сотрудниками ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России за период 1988–1995 гг. Средства измерения соответствовали требованиям к нижней границе рабочего диапазона на территориях как со средними, так и с низкими плотностями загрязнения [10].

С жителями населенных пунктов был проведен инструктаж о правилах эксплуатации дозиметров, задача которых осуществлялась с учетом представительности по типу занятости населения. Срок ношения дозиметра составлял в среднем один месяц.

После сбора дозиметров осуществлялось их измерение одновременно с фоновыми партиями. Полученные результаты заносились в базу данных и в дальнейшем обрабатывались по специальной программе.

В предыдущих исследованиях [7; 10] были выявлены информативные фактор-признаки, которые статистически обоснованно в совокупности оказывают влияние на формирование индивидуальной дозы внешнего облучения: профессиональная занятость и гендерно-возрастные особенности индивида. Таким образом, ранее было классифицировано 6 групп объединенных профессий по типу занятости населения (группа профессиональной занятости), которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Группы профессиональной занятости

Table 1

Occupational groups

Группа	Тип занятости
1*	Дети: дошкольники, школьники младших и старших классов
2*	Инвалиды, пенсионеры, безработные и домохозяйки
3*	Студенты, служащие, военнослужащие, медицинские работники
4*	Водители и механизаторы, животноводы, работники сельского хозяйства, рабочие
5*	Полеводы
6*	Работники лесхозов

\* – Результаты апостериорного сравнения групп ( $p < 0,05$ ).

Для построения модели оценки индивидуализированной дозы внешнего облучения применен метод прикладной статистики – множественная линейная регрессия. Оценка соответствия распределения исследуемых данных модели нормальному распределению проводилась тестом Колмогорова – Смирнова (d). Для количественных данных, распределение которых отлично от нормального, в качестве описательных статистик рассчитывались медиана и квартили распределения дозы внешнего облучения (Me (Q1;Q3)). Сравнение двух зависимых выборок осуществляли непараметрическим тестом Вилкоксона (W). Для сравнения двух независимых выборок применяли непараметрический тест Манна – Уитни (U). Сравнение нескольких групп осуществляли ранговым критерием Краскела – Уоллиса (H) с последующим апостериорным сравнением (поправка Бонферрони). Сила линейной корреляционной связи между двумя выборками определялась непараметрическим тестом Тау-Кендалла (τ). Уравнения для оценки индивидуализированной дозы внешнего облучения для каждой группы профессиональной занятости (с учетом социальных и демографических факторов) были получены методом множественной линейной регрессии с последующей проверкой типа распределения регрессионных остатков. Доверительный интервал реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения для групп профессиональной занятости рассчитывали для  $t$ -распределения Стьюдента [95 % ДИ: среднее – ( $t_{0,05} \times$  ст. ош. среднего); среднее + ( $t_{0,05} \times$  ст. ош. среднего)].

<sup>6</sup>Методика выполнения измерений индивидуальных доз с помощью термолюминесцентного дозиметрического комплекта на основе детекторов А1 О, для решения задач прикладного ИДК: методические рекомендации. Б-5454. ИБФ МЗ СССР. Москва, 1991. 28 с.

Уровень значимости принят равным 0,05. Статистическая обработка данных проводилась с использованием *MS Excel* и программного пакета для статистического анализа *Statistica 12.0* (*StatSoft*, USA).

### Результаты исследования и их обсуждение

Основной метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на радиоактивно загрязненной территории, явились выявленные ранее информативные фактор-признаки и модель множественной линейной регрессии. Обучающая выборка сформирована из репрезентативных данных об индивидуальных дозах внешнего облучения за период с 1988 по 1992 гг. Целевой фактор-признак – индивидуальная годовая доза внешнего облучения лиц, вошедших в группы профессиональной занятости (далее – ГПЗ), которые представлены в табл. 1. В качестве объясняющих факторов-признаков были использованы: плотность загрязнения территории ( $\sigma$ ) по  $^{137}\text{Cs}$  исследуемого населенного пункта (далее – НП),  $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ ; гендерная принадлежность ( $G$ ) индивида (используется бинарная классификация: 0 – женщины, 1 – мужчины); возраст ( $A$ ), количество полных лет.

Для обеспечения адекватности регрессионной модели и сохранности ее эффективности путем снижения вероятности появления выбросов, которые негативно могут сказаться на работе модели в целом, годовая индивидуальная доза внешнего облучения и плотность загрязнения НП были представлены как логарифмы входной величины – универсальное семейство преобразований Бокса – Кокса [13].

Таким образом, модель множественной линейной регрессии имеет вид:

$$\ln(E_i^{ext}) = b_i + \left[ k_{1i} \cdot \ln\left(\frac{\sigma}{37}\right) \right] + [k_{2i} \cdot G] + [k_{3i} \cdot A], \quad (1)$$

где  $E_i^{ext}$  – индивидуальная годовая доза внешнего облучения лица, относящегося к соответствующей  $i$ -той группе профессиональной занятости,  $\text{мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$ ;  $b_i$  – свободный член уравнения регрессии для  $i$ -той группы профессиональной занятости,  $\text{мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$ ;  $k_{1i}, k_{2i}, k_{3i}$  – коэффициенты регрессии, соответствующие каждому объясняющему фактору для  $i$ -той группы профессиональной занятости, отн. ед.

Параметры модели множественной линейной регрессии для каждой группы профессиональной занятости представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры уравнения регрессии для групп профессиональной занятости

Table 2

Parameters of the regression equation for occupational groups

ГПЗ	$b$	$k_1(\sigma)$	$k_2(G)$	$k_3(A)$	$R^2_{adj}$	$F$
1*	-0,248***	0,294***	0,019***	0,043***	0,737	1760
2*	-0,432***	0,649***	0,019*	-0,001	0,741	2296
3*	-0,169***	0,498***	0,103***	0,002***	0,732	1297
4*	-0,197***	0,538***	0,029***	0,004***	0,710	3832
5*	-0,082	0,491***	-0,006	0,005***	0,743	442
6*	1,054***	0,115***	0,032	0,004***	0,743	85

\* – уровень значимости регрессионной модели ( $p < 0,0001$ );

\*\*  $p < 0,05$ , \*\*\*  $p < 0,001$ , \*\*\*\*  $p < 0,0001$  – соответствующие уровни значимости для коэффициентов в уравнении множественной линейной регрессии.

Как следует из табл. 2, скорректированные коэффициенты детерминации ( $R^2_{adj}$ ) показывают высокую степень адекватности регрессионной модели для каждой группы профессиональной занятости. При этом стоит отметить высокую значимость предикторов полученных уравнений регрессии для каждой группы в целом.

Для оценки адекватности модели дополнительно был проведен анализ распределения регрессионных остатков [13] для каждой группы профессиональной занятости, которые соответствуют нормальному распределению, о чем свидетельствуют результаты тестов Колмогорова – Смирнова, представленные на рис. 1.

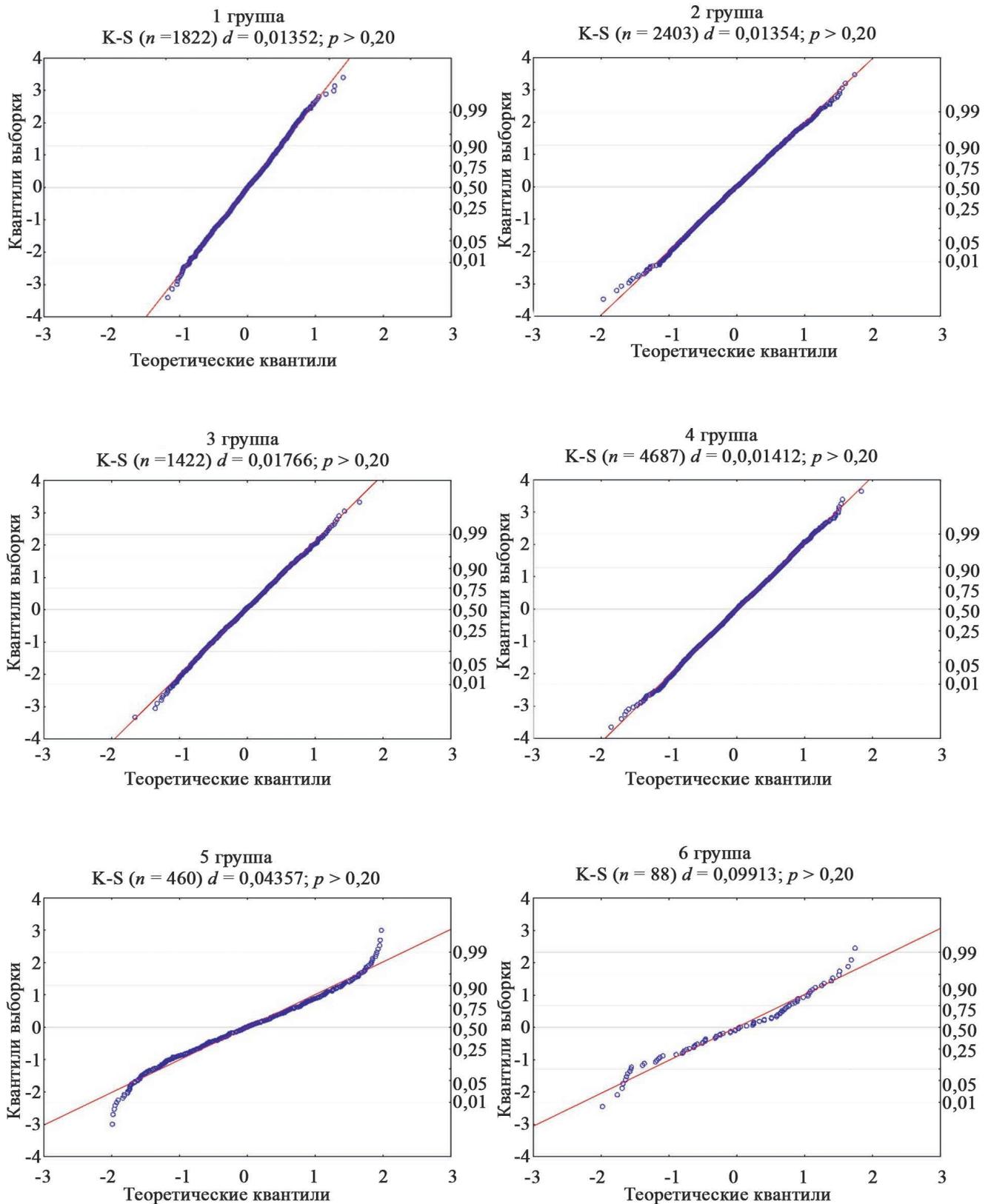


Рис. 1. Распределение остатков для групп профессиональной занятости

Fig. 1. Q-Q residuals plots for occupational groups

Физический распад, миграция радионуклидов, а также комплекс проведенных противорадиационных мероприятий обеспечивают снижение дозы внешнего облучения со временем (рис. 2).

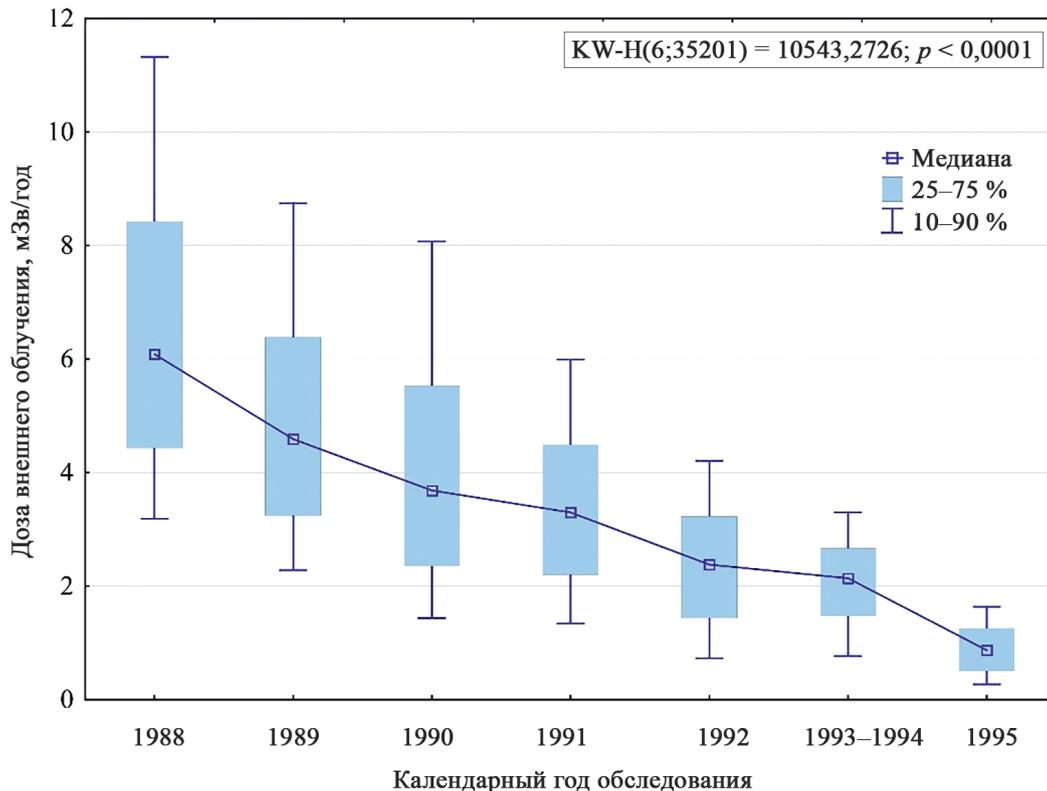


Рис. 2. Динамика дозы внешнего облучения за исследуемый период

Fig. 2. Dynamics of external exposure dose over the research period

Данные о дозах внешнего облучения за 1993–1994 гг. были объединены в одну выборку, поскольку за этот временной промежуток не было выявлено значимых различий в значениях дозы внешнего облучения ( $U = 7,2 \cdot 10^4$ ;  $p = 0,146$ ). Поскольку разработанная модель относится к конкретному году, а интерес представляет оценка индивидуализированных доз внешнего облучения за каждый год послеаварийного периода, то необходимо было предусмотреть дополнительный параметр модели, позволяющий ее применение для любого периода. С этой целью был рассчитан коэффициент, характеризующий снижение дозы внешнего облучения, значения которого были получены по результатам статистического анализа данных, содержащихся в Каталогах средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Беларуси за 1992, 2004, 2009, 2015 и 2020 годы, а также о годовых эффективных дозах внешнего облучения выборочных наиболее представительных населенных пунктов разного типа и условий формирования дозы внешнего облучения.

Коэффициент снижения ( $K_{reduce}$ ) был рассчитан как отношение среднего значения дозы внешнего облучения текущего года к предшествующему.

$$K_{reduce_j} = \frac{\overline{E}_j^{ext}}{\overline{E}_{j-1}^{ext}}, \quad (2)$$

где  $K_{reduce_j}$  – коэффициент снижения дозы внешнего облучения для  $j$ -того типа НП, отн. ед;  $\overline{E}_j^{ext}$  – средняя годовая доза внешнего облучения текущего года, мЗв·год<sup>-1</sup>;  $\overline{E}_{j-1}^{ext}$  – средняя годовая доза внешнего облучения предшествующего года, мЗв·год<sup>-1</sup>.

Рассчитанные коэффициенты снижения дозы внешнего облучения в зависимости от типа НП представлены в табл. 3.

Сравнительный анализ рассчитанных доз внешнего облучения с учетом полученного коэффициента с данными ИДК был проведен на исследуемой выборке за период с 1988 по 1995 гг. и представлен на рис. 3.

Сравнительный анализ показал, что рассчитанные значения дозы внешнего облучения на основе коэффициента имеют сильную корреляционную связь ( $\tau = 0,9987$ ;  $p = 0,0016$ ) с данными ИДК за исследуемый период, при этом отклонение рассчитанных значений дозы внешнего облучения от данных ИДК лежит в интервале  $\pm 9\%$  ( $W = 10$ ;  $p = 0,50$ ).

Коэффициенты снижения дозы внешнего облучения

Table 3

Reduction coefficients of external exposure dose

Период	Значение коэффициента $K_{reduce}$ , отн. ед.		
	Город	Поселок городского типа	Сельский населенный пункт
1986 <sup>*</sup>	0,576	1,080	1,800
1987–1988 <sup>*</sup>	0,400	0,750	1,250
1989–1994	0,229	0,429	0,614
1995–1997	0,100	0,188	0,313
1998–1999	0,050	0,094	0,156
2000–2004	0,067	0,125	0,208
2005–2009	0,040	0,075	0,125
2010–2015	0,033	0,063	0,104
2016–2020	0,022	0,042	0,069
2021–2030	0,018	0,034	0,057
2031–2041	0,017	0,031	0,052

<sup>\*</sup> – Для 1986 г. коэффициент был получен путем экстраполяции по методическим рекомендациям 1991 г. «Методические основы прогноза уровней облучения населения от радионуклидов цезия при постоянном проживании на территориях, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС».

<sup>\*</sup> – Для детей в возрасте до 18 лет с 1988 по 1995 г., вне зависимости от типа НП, коэффициент принят 0,17 при  $\sigma < 12 \text{ Ки} \cdot \text{км}^2$ .

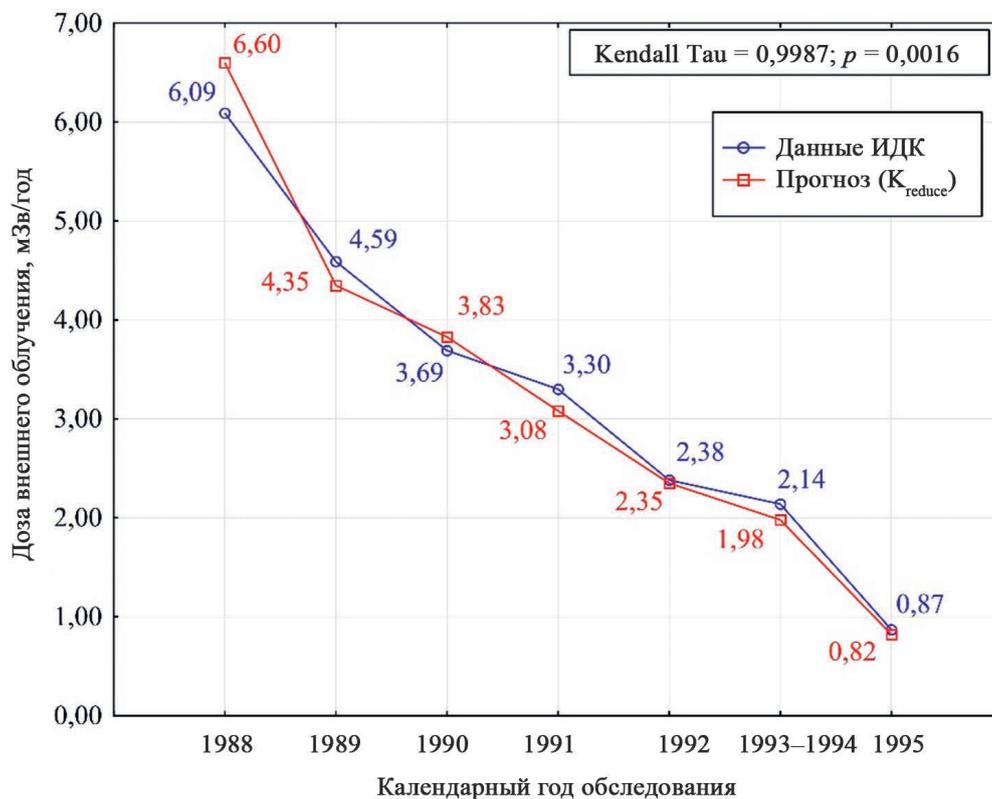


Рис. 3. Сравнение рассчитанных (с учетом коэффициента снижения) доз внешнего облучения с данными ИДК

Fig. 3. Comparison of calculated external exposure doses (taking into account the reduction factor) with IDC data

Таким образом, модель оценки индивидуализированной дозы внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории, учитывающая их социально обусловленное поведение и демографические факторы, может быть представлена в виде уравнения:

$$E_i^{ext} = K_{reduce_j} \cdot e^{(b_i + [k_{1_i} \cdot \ln(\frac{\sigma}{37})] + [k_{2_i} \cdot G] + [k_{3_i} \cdot A])} \quad (3)$$

Для проведения верификации модели была сформирована контрольная выборка из данных ИДК, не вошедших в обучающую выборку, то есть с 1993 по 1995 г.

Был проведен расчет индивидуализированных доз внешнего облучения для лиц, входящих в соответствующие группы профессиональной занятости.

Верификация модели для выбранных случайным образом индивидуальных доз внешнего облучения из контрольной выборки (рис. 4) показала, что модельные оценки и данные ИДК практически не различимы ( $W = 189,50$ ;  $p = 0,76$ ), ошибка оценки модели составила в среднем  $\pm 11\%$  ( $\tau = 0,9966$ ;  $p < 0,0001$ ).

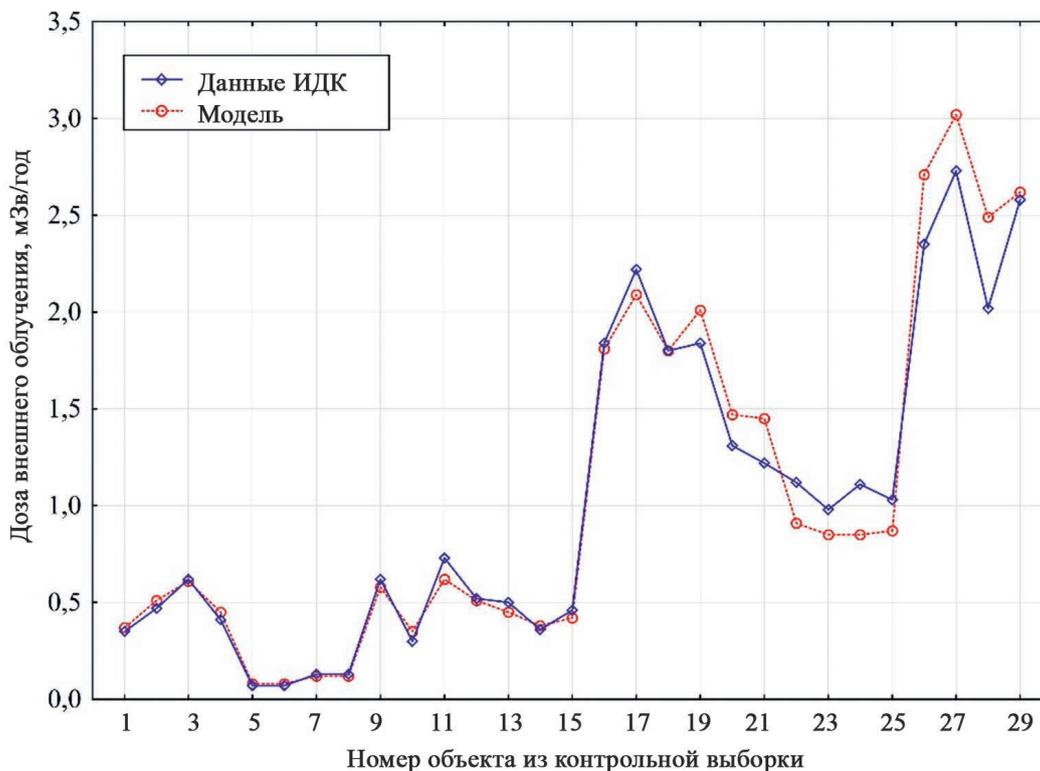


Рис. 4. Сравнение прогнозных оценок модели с данными ИДК (для выбранных случайным образом объектов из контрольной выборки)

Fig. 4. Comparison of model forecast estimates with IDC data (for randomly selected objects from the control sample)

Аналогично была проведена верификация модельных оценок индивидуализированной дозы внешнего облучения для каждой группы профессиональной занятости в отдельности. Сравнительный анализ модельных индивидуализированных доз внешнего облучения для ГПЗ с данными ИДК также показал, что между ними отсутствуют статистически значимые различия ( $W = 9,00$ ;  $p = 0,75$ ), сильная корреляционная связь ( $\tau = 0,9989$ ;  $p < 0,005$ ), при этом ошибка оценки модели, как и ожидалось, снизилась до  $\pm 5\%$  (рис. 5).

Для оценки преимущества разработанного метода перед существующей методикой, принятой в 2014 г. в Республике Беларусь<sup>7</sup>, был проведен сравнительный анализ рассчитанных доз внешнего облучения по двум методам с данными ИДК (рис. 6).

Сравнительный анализ методов оценки индивидуализированных доз внешнего облучения с данными ИДК, выбранных случайным образом из контрольной выборки, показал статистически значимые различия между данными, рассчитанными по предложенной модели и действующей методике ( $W = 73$ ;  $p = 0,0018$ ). При этом наблюдается сильная корреляционная связь рассчитанных доз по разработанной модели с данными ИДК ( $\tau = 0,93$ ;  $p < 0,0001$ ), а между дозами, рассчитанными по методике 2014 г., и данными ИДК корреляционная связь слабее ( $\tau = 0,48$ ;  $p < 0,001$ ). Ошибка оценки разработанной модели составила  $\sim$  в среднем  $11\%$ , а ошибка методики, применяемой в Республике Беларусь  $\sim 40\%$ .

<sup>7</sup>Метод реконструкции индивидуализированных накопленных доз облучения включенных в Государственный регистр лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий: инструкция по применению, утвержденная Министерством здравоохранения Республики Беларусь 12 декабря 2014 г., № 095-0914. Гомель, 2014. 9 с.

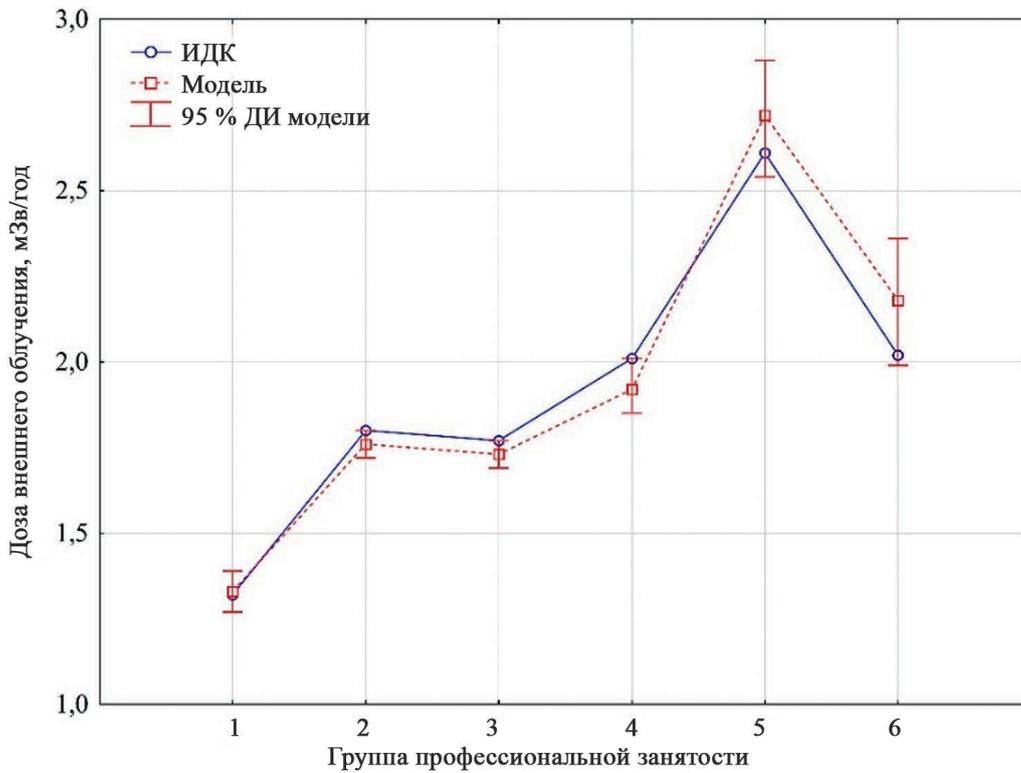


Рис. 5. Сравнение прогнозных оценок модели с данными ИДК (для групп профессиональной занятости в целом)

Fig. 5. Comparison of model forecast estimates with IDC data (for occupational groups in general)

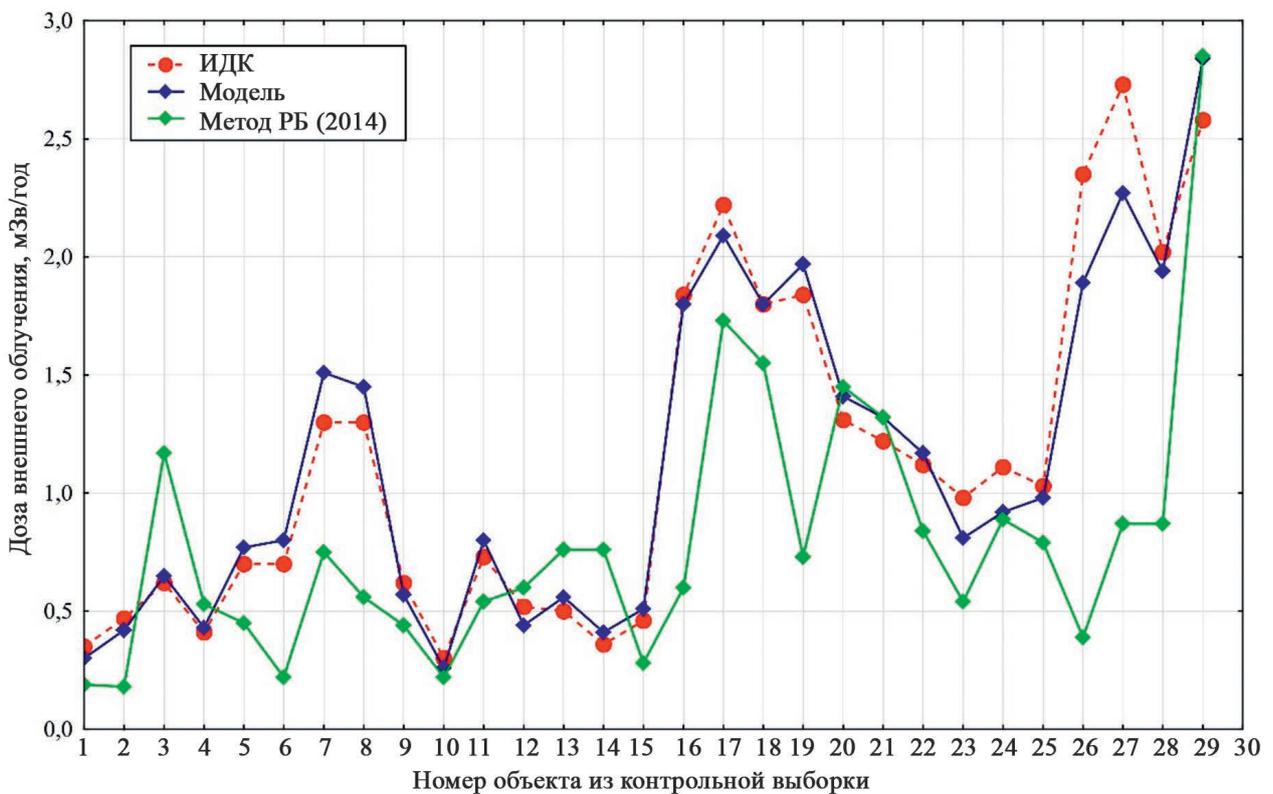


Рис. 6. Сравнительный анализ методов с данными ИДК

Fig. 6. Comparative analysis of methods with IDC data

Разработанная статистическая модель не противоречит методическому подходу реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения, применяемому в Республике Беларусь, но при этом позволяет учесть косвенный фактор, оказывающий влияние на формирование дозы внешнего облучения – профессиональную занятость, что позволяет снизить ошибку оценки.

### Заключение

В результате проведенного исследования были статистически обоснованы положения, вносящие вклад в расширение представлений о закономерностях формирования доз внешнего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях. Установлена зависимость индивидуальных доз внешнего облучения от демографических и социальных характеристик индивида.

По результатам сравнительного анализа разработанного метода и методики оценки индивидуализированных доз внешнего облучения, применяемой в Республике Беларусь, установлено, что между данными, рассчитанными по предложенному методу и действующей методике наблюдаются статистически значимые различия, при этом между рассчитанными дозами по разработанному методу и данными ИДК наблюдается сильная корреляционная связь, а между дозами, рассчитанными по методике 2014 г., и данными ИДК корреляционная связь слабее. Ошибка оценки разработанного метода ~ в 4 раза ниже, чем таковая в применяемой в Республике Беларусь методике.

Разработанный метод оценки индивидуализированных доз внешнего облучения может быть использован при недостатке или отсутствии данных индивидуального дозиметрического контроля как для ретроспективной, так и проспективной оценки доз внешнего облучения за счет введенного коэффициента, характеризующего снижение дозы внешнего облучения, что, в свою очередь, позволит проводить оценку индивидуализированных доз внешнего облучения за любой календарный год с высокой степенью точности у лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории, учитывая их социальный и демографический статус.

Рассчитанные таким образом индивидуализированные накопленные дозы внешнего облучения наряду с индивидуализированными накопленными дозами внутреннего облучения будут использованы в радиационно-эпидемиологических исследованиях для установления зависимости «доза – эффект» и оценки радиационных рисков.

### Библиографические ссылки

1. Власова НГ. Методический подход реконструкции индивидуализированных доз облучения лиц, подвергшихся воздействию радиации в результате аварии на ЧАЭС. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2013;58(10):24–33.
2. Веялкин ИВ, Чешик АА, Семененко ОФ, Власова НГ, Горбун ЮВ, Веялкина НН. Заболеваемость злокачественными новообразованиями отдельных органов в зависимости от индивидуализированных накопленных доз. *Проблемы здоровья и экологии*. 2015;45(3):78–84. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2015-12-3-18>.
3. Skryabin AM, Savkin MN, Grinev M, Robinson CA, Prosser SL, Jones KA. Distribution of doses received in rural areas affected by the Chernobyl accident. *Didcot: National Radiological Protection Board*; 1995. 52 p.
4. Allen PT, Archangelskaya GV, Belyaev ST, Demin VF, Drottz-Sjoberg BM, Hedemann-Jenson P. Optimization of health protection of the public following a major nuclear accident: interaction between radiation protection and social and psychological factors. *Health Physics*. 1996;71(5):763–765. DOI: 10.1097/00004032-199611000-00019.
5. Golikov VYu, Balonov MI, Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident. *Biophysics*. 2002;41(10):185–193. DOI: 10.1007/s00411-002-0167-2.
6. Vlasova NG, Rozhko AV, Visenberg YuV, Drozd EA. Dose Assessment in Population Living on Contaminated Territories at the Remote Period after the Chernobyl Accident. International Conference on Global Emergency Preparedness and Response. International Atomic Energy Agency (IAEA). Book of Synopses. IAEA Headquarters. Vienna: IAEA; 2015. p. 250–255.
7. Куликович ДБ, Власова НГ. Выявление однородных по дозе внешнего облучения групп жителей загрязненных территорий по совокупности информативных фактор-признаков. *Проблемы здоровья и экологии*. 2023;20(1):123–130. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2023-20-1-15>.
8. Матарас АН, Эвентова ЛН, Висенберг ЮВ, Власова НГ. Методический подход оценки индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на ЧАЭС. *Проблемы здоровья и экологии*. 2014;40(2):91–96. DOI: [doi.org/10.51523/2708-6011.2014-11-2-19](https://doi.org/10.51523/2708-6011.2014-11-2-19).
9. Muller H, Prohl G. Ecosys-87: A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents. *Health Physics*. 1993;63(3):232–252. DOI: 10.1097/00004032-199303000-00002.
10. Куликович ДБ, Власова НГ. Статистический анализ факторов, оказывающих влияние на формирование дозы внешнего облучения. *Проблемы здоровья и экологии*. 2022;19(3):99–105. DOI: [doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-3-14](https://doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-3-14).
11. International Atomic Energy Agency. Working papers of the TC project RER/9/074 «Radiation monitoring of public exposure in the remote period after the accident at the Chernobyl nuclear power plant». Vienna: IAEA; 2007.
12. Likhtariov I, Kovgan L, Novak D, Vavilov S, Jacob P, Paretzke HG. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine. *Health Physics*. 1996;70(1):87–98. DOI: 10.1097/00004032-199601000-00013.
13. Мастицкий СЭ, Шитиков ВК. *Статистический анализ и визуализация данных с помощью R*. Москва: ДМК Пресс; 2015. 496 с.

## References

1. Vlasova NG. *Metodicheskij podhod rekonstrukcii individualizirovannyh doz oblucheniya lic, podvergshih'sya vozdeystviyu radiacii v rezul'tate avarii na CHAES* [Methodological approach to reconstructing individualized radiation doses of persons exposed to radiation as a result of the Chernobyl accident]. *Medicinskaya radiologiya i radiacionnaya bezopasnost* [Medical Radiology and Radiation Safety]. 2013;58(3):24–33. Russian.
2. Veyalkin IV, Cheshik AA, Semenenko OF, Vlasova NG, Gorbun YuV, Veyalkina NN. *Zabolevaemost' zlokachestvennyimi novoobrazovaniyami ot del'nyh organov v zavisimosti ot individualizirovannyh nakoplenykh doz* [Incidence of malignant neoplasms of certain organs depending on individualized accumulated irradiation doses]. *Health and Ecology Issues*. 2015;45(3):78–84. Russian. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2015-12-3-18>.
3. Skryabin AM, Savkin MN, Grinev M, Robinson CA, Prosser SL, Jones KA. Distribution of doses received in rural areas affected by the Chernobyl accident. *Didcot: National Radiological Protection Board*; 1995. 52 p.
4. Allen PT, Archangelskaya GV, Belyaev ST, Demin VF, Drottz-Sjoberg BM, Hedemann-Jenson P. Optimization of health protection of the public following a major nuclear accident: interaction between radiation protection and social and psychological factors. *Health Physics*. 1996;71(5):763–765. DOI: 10.1097/00004032-199611000-00019.
5. Golikov VYu, Balonov MI, Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident. *Biophysics*. 2002;41(10):185–193. DOI: 10.1007/s00411-002-0167-2.
6. Vlasova NG, Rozhko AV, Visenberg YuV, Drozd EA. Dose Assessment in Population Living on Contaminated Territories at the Remote Period after the Chernobyl Accident. International Conference on Global Emergency Preparedness and Response. International Atomic Energy Agency (IAEA). Book of Synopses. IAEA Headquarters. Vienna: IAEA; 2015. p. 250–255.
7. Kulikovich DB, Vlasova NG. *Vyyavlenie odnorodnykh po doze vneshnego oblucheniya grupp zhitelej zagryaznennykh territorij po sovokupnosti informativnykh faktor-priznakov* [Identification of groups of residents in contaminated territories homogeneous in the external exposure dose by a set of informative factors-signs]. *Health and Ecology*. 2023;20(1):123–130. Russian. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2023-20-1-15>.
8. Mataras AN, Eventova LN, Visenberg YuV, Vlasova NG. *Metodicheskij podhod ochenki individualizirovannyh doz vneshnego oblucheniya lic, podvergshih'sya vozdeystviyu radiacii vsledstvie katastrofy na CHAES* [Methodological approach to the assessment of individualized external dose in people affected after the Chernobyl accident]. *Health and Ecology Issues*. 2014;40(2):91–96. Russian. DOI: [doi.org/10.51523/2708-6011.2014-11-2-19](https://doi.org/10.51523/2708-6011.2014-11-2-19).
9. Muller H, Prohl G. Ecosys-87: A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents. *Health Physics*. 1993;63(3):232–252. DOI: 10.1097/00004032-199303000-00002.
10. Kulikovich DB, Vlasova NG. *Statisticheskij analiz faktorov, okazyvayushchih vliyanie na formirovanie dozy vneshnego oblucheniya* [Statistical analysis of factors contributing to the formation of the external exposure dose]. *Health and Ecology Issues*. 2022;19(3):99–105. Russian. DOI: [doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-3-14](https://doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-3-14).
11. International Atomic Energy Agency. Working papers of the TC project RER/9/074 «Radiation monitoring of public exposure in the remote period after the accident at the Chernobyl nuclear power plant». Vienna: IAEA; 2007.
12. Likhtariov I, Kovgan L, Novak D, Vavilov S, Jacob P, Paretzke HG. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine. *Health Physics*. 1996;70(1):87–98. DOI: 10.1097/00004032-199601000-00013.
13. Masticzkij SE, Shitikov VK. *Statisticheskij analiz i vizualizaciya dannykh s pomoshch'yu R* [Statistical analysis and Data visualization using R]. Moscow: DMK Press; 2015. 496 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 30.01.2024.  
Received by editorial board 30.01.2024.

---

---

# ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

---

## INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

---

---

УДК 543.423.1;631.416.8

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАСТВОР ПРИ ПРОБОПОДГОТОВКЕ ОБРАЗЦОВ ПОЧВЫ

С. С. ПОЗНЯК<sup>1)</sup>, М. А. СТЕПАНИЮК<sup>1)</sup>

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

Исследовалась эффективность использования (применимость) различных методов экстрагирования тяжелых металлов (химических элементов) в раствор при пробоподготовке образцов почвы для рутинного определения тяжелых металлов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Согласно имеющейся в научной литературе информации, эффективность методов кислотного разложения по степени воздействия на почву возрастает в следующем порядке: разложение кипячением в открытой посуде → разложение в автоклаве → разложение в микроволновой печи. Это обусловлено тем, что при разложении кипячением образца смесью кислот в открытой системе, происходит потеря элементов из-за улетучивания, а также из-за вторичного их поглощения нерастворимым остатком почвы, содержащим большое количество реакционноспособных по отношению к тяжелым металлам гидроксидов железа.

---

#### Образец цитирования:

Позняк СС, Степаниук МА. Эффективность использования методов экстрагирования химических элементов в раствор при пробоподготовке образцов почвы. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;1:58–69. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-58-69>

#### For citation:

Pazniak SS, Stepanyuk MA. Effectiveness of using methods for extraction of chemical elements into solution when sample preparation of soil samples. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;1:58–69. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-58-69>

---

#### Авторы:

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

**Михаил Александрович Степаниук** – младший научный сотрудник лаборатории исследования материалов, веществ и изделий научного отдела технических, криминалистических и специальных исследований.

#### Authors:

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

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

**Mikhail A. Stepanyuk**, junior researcher at the laboratory for study of materials, substances and products of the scientific department of technical, forensic and special research.

[mike-stepa@yandex.by](mailto:mike-stepa@yandex.by)

Использование различных вариантов микроволнового кислотного разложения почв должно выполняться в зависимости от набора изучаемых элементов. Неполное кислотное разложение проводят в случае анализа ограниченного набора тяжелых металлов, который позволяет упростить процедуру разложения, сократить общее время выполнения анализа, отказаться от использования вредных химических реагентов без ущерба качеству получаемых результатов. Выделение элементов, связанных с органическим веществом почв, для некоторых типов экстракции осуществлялось с помощью добавления 30%-ной  $H_2O_2$  и при отстаивании образца в течение 10 мин до разбавления образца, но после микроволнового разложения. В ходе проведения исследований установлено, что наиболее эффективным способом экстракции тяжелых металлов (химических элементов) из почвы в раствор является экстракция с использованием метода разложения царской водкой. Метод разложения почвы (химических элементов) азотной кислотой может применяться при отсутствии иных альтернатив пробоподготовки. Он дал приемлемые результаты разложения для оценки загрязнения почв тяжелыми металлами. Экстракция проб в азотной кислоте при добавлении 30%-ной перекиси водорода существенно повышает окислительные способности азотной кислоты и позволяет исключить загрязнение проб посторонними веществами.

**Ключевые слова:** атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой; тяжелые металлы; валовое содержание; образцы почвы; пробоподготовка; микроволновое разложение; способ экстракции.

## EFFECTIVENESS OF USING METHODS FOR EXTRACTION OF CHEMICAL ELEMENTS INTO SOLUTION WHEN SAMPLE PREPARATION OF SOIL SAMPLES

S. S. PAZNIAK<sup>a</sup>, M. A. STEPANYUK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Scientific and Practical Centre of the State Forensic Examination Committee of the Republic of Belarus,  
25 Filimonava Street, Minsk 220114, Belarus

Corresponding author: S. S. Pazniak (sspazniak@gmail.com)

In our studies, we studied the effectiveness of using (applicability) of various methods for extracting heavy metals (chemical elements) into solution during sample preparation of soil samples for routine determination of heavy metals using inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy. According to the information available in the scientific literature, the effectiveness of acid decomposition methods in terms of the degree of impact on the soil increases in the following order: decomposition by boiling in an open container → decomposition in an autoclave → decomposition in a microwave oven. This is due to the fact that when a sample is decomposed by boiling with a mixture of acids in an open system, a loss of elements occurs due to volatilization, as well as due to their secondary absorption by the insoluble soil residue containing a large amount of iron hydroxides reactive towards heavy metals. The use of different options for microwave acid decomposition of soils should be carried out depending on the set of elements being studied. Incomplete acid decomposition is carried out in the case of analyzing a limited set of heavy metals, which makes it possible to simplify the decomposition procedure, reduce the overall analysis time, and eliminate the use of harmful chemical reagents without compromising the quality of the results obtained. Isolation of elements associated with soil organic matter for some types of extraction was carried out by adding 30 %  $H_2O_2$  and allowing the sample to sit for 10 minutes before diluting the sample, but after microwave digestion. During the research, it was found that the most effective way to extract heavy metals (chemical elements) from soil into solution is extraction using the decomposition method with aqua regia. The method of decomposition of soil (chemical elements) with nitric acid can be used in the absence of other sample preparation alternatives and also gave acceptable decomposition results for assessing soil contamination with heavy metals. Extraction of samples in nitric acid with the addition of 30 % hydrogen peroxide significantly increases the oxidizing ability of nitric acid and eliminates contamination of samples with foreign substances.

**Keywords:** inductively coupled plasma atomic emission spectrometry; heavy metals; bulk content; soil samples; sample preparation; microwave decomposition; extraction method.

### Введение

В современных условиях самым распространенным и в тоже время высокочувствительным инструментом для качественного и количественного анализа химических элементов в жидких и твердых веществах является метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП). Важным достоинством этого метода по сравнению с другими спектральными, а также многими химическими и физико-химическими является возможность одновременного определения большого числа элементов в широком интервале концентраций с приемлемой точностью при использовании малой массы пробы. В настоящее время с помощью эмиссионного анализа, в зависимости от объекта и модификации прибора, определяют концентрации  $\sim 10^{-4}$ – $10^{-6}$  %, относительная стандартная ошибка определения малых содержаний элемента, как правило,  $\geq 15$ – $25$  % [1].

АЭС-ИСП представляет собой метод атомно-эмиссионной спектроскопии, в котором в качестве источника возбуждения атомов используется индуктивно-связанная плазма. В основе данного метода лежит измерение интенсивности излучения света, испускаемого на определенных длинах волн атомами, возбужденными индуктивно-связанной аргоновой плазмой. Количественное определение связано с количеством электромагнитного излучения, которое испускается, тогда как качественная информация (какие элементы присутствуют) связана с длиной волны испускаемого излучения. В большинстве случаев объектом исследования АЭС-ИСП являются растворы. Поэтому твердые пробы предварительно растворяют в кислотах. Полученный раствор с помощью перистальтического насоса подается в распылитель, в котором потоком аргона превращается в аэрозоль и затем переносится в плазму, где десольватируется, испаряется, атомизируется и возбуждается или ионизируется плазмой. Возбужденные атомы и ионы испускают характеристическое излучение. Это излучение собирается устройством, сортирующим излучение по длинам волн, детектируется и преобразуется в электронные сигналы, которые преобразуются в информацию по концентрациям [2].

Данный метод анализа широко используют в различных странах для исследования уровня загрязнения тяжелыми металлами различных объектов. Например, статья [3] посвящена определению уровня загрязнения тяжелыми металлами (Pb, Cd, Zn, Cu, As, Cr, Ni, V) сельскохозяйственных почв. Для оценки возможного воздействия загрязнения было проанализировано содержание 21 элемента в 30 пробах почвы, отобранных из равномерно распределенных мест на территории электростанции, а также некоторых проб, отобранных на свободной от загрязнения территории, на расстоянии 40 км от зоны загрязнения. Полученные результаты сравнивались с целевыми уровнями и уровнями поступления этих элементов в почву.

В работе [4] представлено исследование, которое было направлено на оценку концентрации и пространственного анализа токсичных металлов (As, Cd, Cu, Ni, Pb и Zn) в почвах. Особое внимание авторы уделяют количественной оценке уровней загрязнения почвы тяжелыми металлами, отбору проб почвы и её химическому анализу, что оказывает значительное влияние на эффективность анализа. Образцы почвы были взяты из верхних 30 см почвы и проанализированы на содержание тяжелых металлов с использованием АЭС-ИСП.

Nyika J. A., et al. [5] проводят сравнение эффективности методов масс-спектрометрии и оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой при количественном определении металлов в загрязненных почвах. Используя статистические инструменты, в исследовании оценивались систематические ошибки двух методов. Высокие коэффициенты вариации были реализованы для концентраций V, Cr и Pb, варьировавшихся на разных участках отбора проб. Концентрации элементов, полученные двумя методами, были проанализированы при помощи *t*-критерия Стьюдента.

В работе [6] концентрации Al, Ni, Co, Mn, Cr, Pb, As и Cd в образцах сельскохозяйственной почвы и колодезной воды определяли с помощью АЭС-ИСП и методом микроволнового кислотного разложения образцов почвы. Со не был обнаружен в образцах, в то время как другие исследованные микроэлементы присутствовали в различных значениях, концентрации которых зависят от типа и местоположения образца. В некоторых образцах почв зафиксированы высокие концентрации Al. Представленный авторами метод анализа валидирован с точки зрения точности, прецизионности, предела количественного определения и надежности подтверждения.

В статье [7] изложено определение состава токсичных металлов (Cr, Mn, Cu, As) и тяжелых металлов (Cd, Ba, Hg, Pb) в почве и воде с помощью АЭС-ИСП. Для обеспечения точности при анализе Cr, Mn, Cu, As, Cd, Ba, Hg и Pb в реальных пробах проанализированы сертифицированные эталонные материалы (CRM, SRM 2709a) почвы и воды Сан-Хоакина (SRM 1640a) и получены результаты, которые представлены в виде процентного извлечения. Средняя концентрация всех металлов в почве и воде не превышала лимита, установленного Европейским сообществом, ВОЗ и Агентством по охране окружающей среды, за исключением Cu, где допустимый предел, установленный ЕС, составляет 50–140 мг/кг в почве. Авторы исследования подробно излагают схему исследования, применяемые реагенты и растворы, а также отбор проб, пробоподготовку, анализ проб воды и почвы.

В нашем исследовании мы изучали эффективность использования (применимость) различных методов экстрагирования тяжелых металлов (химических элементов) в раствор при пробоподготовке образцов почвы для рутинного определения тяжелых металлов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой.

## Материалы и методы исследования

Образцы почвы отбирали на пробной площадке из одного или нескольких горизонтов в соответствии с ТКП 17.03-02-2020. Для химического анализа объединенную пробу составляли не менее чем из пяти точечных проб, взятых с одной пробной площадки. Масса объединенной пробы не менее 1 кг. Точечные пробы отбирали послойно с глубины 0–5 и 5–20 см массой не более 200 г каждая. При отборе точечных проб

и составлении объединенной пробы была исключена возможность их вторичного загрязнения. Точечные пробы почвы отбирали инструментом, не содержащим металлов. Перед отбором точечных проб стенку прикопки или поверхность керна зачищали ножом из полиэтилена или полистирола либо пластмассовым шпателем.

За основу для пробоподготовки при извлечении тяжелых металлов из образцов почвы для исследования методом АЭС-ИСП были использованы два метода разложения:

- метод разложения царской водкой (ГОСТ 202036-2014);
- метод разложения азотной кислотой (МВИ.МН 3369-2010).

Оборудование, а также мерные емкости для обоих методов, которые находились в контакте с раствором для разложения исследуемого образца, были тщательно вымыты теплой азотной кислотой, разбавленной водой до 10 %, затем 3–4 раза промыты водой 1-го класса (бидистиллированная или деионизованная вода с удельным сопротивлением  $\geq 18,2$  МОм/см).

Главный принцип методов разложения пробы основан на минерализации образца кислотой при повышенных температуре и давлении в сосуде (XP-1500), пронизываемом для микроволнового излучения. Поскольку при проведении процесса микроволнового разложения необходим контроль за потерей веса, сосуды с образцами и кислотой взвешивали с точностью до 0,01 г перед началом и в конце процесса микроволнового разложения (после охлаждения). Если вес образца изменился более чем на 10 %, устанавливалась и устранялась причина потери веса, после чего процедура минерализации проводилась заново.

При пробоподготовке почвы для обоих методов брали навеску гомогенизированного образца не более 0,5 г (фракция  $\leq 1$  мм), в соответствии с инструкцией по безопасной эксплуатации микроволновой системы SEM MARS 5, взвешенную с точностью отсчета 0002 г. В соответствии с ГОСТ ISO 11464–2015, исследуемый образец почвы подвергался дроблению, когда земля еще сырая и рыхлая, и затем еще раз после сушки перед просеиванием образца через сито. Пробы почвы для химического анализа высушены до воздушно-сухого состояния, а для получения представительных аналитических проб с определенной массой применяли метод квартования. Затем пробу количественно переносили в сосуд для микроволнового разложения (XP-1500). Если образец содержал легко летучие или легко окисляемые органические вещества, навеска составляла не более 0,1 г, при этом необходимо наблюдать за протеканием реакции в сосуде перед тем, как его закрыть. Если видимой реакции не наблюдается, можно довести навеску до 0,25 г.

Метод разложения почвы азотной кислотой МВИ. МН 3369-2010 предназначен для определения содержания Al, V, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn. По данной методике к образцу почвы (навеска 0,5 г) добавляют  $10 \pm 0,1$  мл концентрированной азотной кислоты. При меньшей навеске образца количество кислоты пропорционально уменьшают.

Метод разложения царской водкой (ГОСТ 202036-2014) предназначен для определения: Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Li, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Rb, Sb, Se, P, Ag, Sn, S, Sr, Tl, Ti, V, Zn. Исходя из рекомендованной максимальной навески почвы, которая не должна превышать массу 0,5 г при микроволновой экстракции в системы SEM MARS 5, во время эксперимента в образец почвы (навеска 0,5 г) добавляли  $2,5 \pm 0,1$  мл концентрированной азотной кислоты, а затем еще  $7,5 \pm 0,1$  мл соляной кислоты. Отношение объема анализируемого образца к царской водке должен быть приблизительно 1:3 (допускается соотношение 1:4). При меньшей навеске образца количество кислоты пропорционально уменьшают.

Сосуд плотно закрывают внутренней и внешней крышками и распределяют в роторе микроволновой системы SEM MARS 5 симметрично с установкой параметров (табл. 1). Максимальный объем жидкости в сосуде не должен превышать половины объема сосуда.

Таблица 1

Условия для микроволнового разложения образцов почвы

Table 1

Conditions for microwave decomposition of soil samples

Параметры	Условия для микроволнового разложения воды
Температура	180 °C
Мощность	1600 W
Давление	400 PSI
Время нагрева до заданной температуры	10 мин
Время удержания при заданной температуре (HOLD)	20 мин
Время охлаждения	10 мин

После завершения процесса разложения сосуда оставались в системе для охлаждения 10 мин, затем из помещали в вытяжной шкаф для дальнейшего охлаждения в течение 20 мин во избежание термических и кислотных ожогов. После полного охлаждения проба фильтровалась через обеззоленный фильтр (синяя лента). Жидкую фракцию количественно переносили в соответствующую мерную колбу и доводили до метки деионизованной водой. Выбор мерной колбы осуществлялся таким образом, чтобы значение концентрации определяемого металла находилось в пределах калибровочного диапазона, в данном эксперименте применялись пластиковые колбы на 100 мл. При расчете концентрации тяжелых металлов в пробе учитывалось изменение объема пробы в процессе пробоподготовки.

Концентрацию определяемого элемента в анализируемых пробах почвы вычисляли по формуле

$$C = \frac{C_k \times V \times K \times n}{m}, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация металла в твердой матрице (мг/кг);  $C_k$  – среднее по трем измерениям значение концентрации металла (мг/л);  $V$  – объем пробы, полученный при пробоподготовке (мл);  $K$  – коэффициент пересчета на абсолютно сухую навеску;  $n$  – степень разбавления подготовленной пробы;  $m$  – масса воздушно-сухой пробы, взятой для анализа (г). Если после пробоподготовки анализируемую пробу не разбавляют, то  $n = 1$ .

Содержание целевых компонентов в ряде случаев должно приводиться в мг/кг абсолютно сухой пробы. Для этого необходимо определить коэффициент пересчета  $K$ , определяемый по формуле

$$K = \frac{M_2}{M_1}, \quad (2)$$

где  $M_1$  – масса пробы в воздушно-сухом состоянии;  $M_2$  – масса абсолютно сухой пробы.

Коэффициент пересчета ( $K$ ) определяют экспериментально, при взвешивании навески  $M_1$  (около 5 г, взвешенной с точностью отсчета 0,0002 г), в воздушно-сухом состоянии и высушивании ее при температуре  $105 \pm 2$  °С до постоянной массы  $M_2$ . Процедура доведения до постоянной массы осуществлялась путем первичного высушивания образца в бюксе с открытой крышкой в течение 4 ч, охлаждения бюкса с закрытой крышкой в эксикаторе, заполненном хлористым кальцием, затем взвешивания с точностью отсчета 0,0002 г. Процедура высушивания, охлаждения и взвешивания повторяется до получения постоянной массы навески образца (разница в массах после повторного высушивания не должна превышать 0,0004 г).

В процессе пробоподготовки применялась азотная кислота (химически чистая)  $\rho$  ( $\text{HNO}_3$ )  $\approx 1,40$  г/мл с массовой долей 65 %, перекись водорода (химически чистая)  $\rho$  ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )  $\approx 1,45$  г/мл с массовой долей 30 %, соляная кислота (химически чистая)  $\rho$  ( $\text{HCl}$ )  $\approx 1,16$  г/мл с массовой долей 37 %, вода 1 класса (бидистиллированная или деионизованная) с удельным сопротивлением  $\geq 18,2$  МОм/см в соответствии с ISO 3696. Проверку чистоты реактивов проводили при помощи испытания с «холостой пробой». Каждая партия наконечников поршневых пипеток (дозаторов) и используемые пластиковые сосуды, которые применялись в течение всего эксперимента, были протестированы на загрязнение.

## Результаты исследования и их обсуждение

Валовое содержание тяжелых металлов, используемых при экологическом мониторинге почв, является одним из основных показателей химического состава. Валовое содержание используют при определении степени загрязнения почв как для сравнения с фоновыми уровнями или ПДК, так и для определения доли каких-либо форм соединений тяжелых металлов.

Согласно имеющейся в научной литературе информации, эффективность методов кислотного разложения по степени воздействия на почву возрастает в следующем порядке: разложение кипячением в открытой посуде → разложение в автоклаве → разложение в микроволновой печи. Это обусловлено тем, что при разложении кипячением образца смесь кислот в открытой системе происходит потеря элементов из-за улетучивания, а также из-за вторичного их поглощения нерастворимым остатком почвы, содержащим большое количество реакционноспособных по отношению к тяжелым металлам гидроксидов железа. Разложение в автоклавах снижает потери от улетучивания и повышает степень разложения (особенно при использовании микроволновой печи) [8].

С целью определения наиболее эффективного типа экстракции для извлечения вышеуказанных тяжелых металлов из образца почвы была предусмотрена следующая схема опыта (табл. 2) с экстракцией стандартного образца почвы (ГОСТ 7185-95) в микроволновой системе разложения (SEM MARS 5).

Данный эксперимент выполнен с использованием оптико-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой *Thermo Fisher iCAP 6300 DUO* на приборной базе управления физико-химических и взрывотехнических экспертиз Центрального аппарата Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь.

Таблица 2

Схема эксперимента с типами экстракции

Table 2

Experimental scheme with extraction types

Проба	Вид экстракции	Количество образца почвы, г	Конечный объем исследуемой пробы, мл
1	HNO <sub>3</sub> (6,25 мл) + H <sub>2</sub> O (25 мл) + H <sub>2</sub> O (3 мл) после извлечения из микроволновой системы	0,5	100
2	HNO <sub>3</sub> (2,5 мл) + HCl (7,5 мл) + H <sub>2</sub> O (25 мл) + H <sub>2</sub> O (3 мл) после извлечения из микроволновой системы	0,5	100
3	HNO <sub>3</sub> (6,25 мл) + H <sub>2</sub> O (25 мл) + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (3 мл) после извлечения из микроволновой системы	0,5	100
4	HNO <sub>3</sub> (2,5 мл) + HCl (7,5 мл) + H <sub>2</sub> O (25 мл) + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (3 мл) после извлечения из микроволновой системы	0,5	100
5	HNO <sub>3</sub> (16 мл) + H <sub>2</sub> O (16 мл) + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (3 мл) после извлечения из микроволновой системы	0,5	100
6	HNO <sub>3</sub> (16 мл) + H <sub>2</sub> O (16 мл) + H <sub>2</sub> O (3 мл) после извлечения из микроволновой системы	0,5	100
7	HNO <sub>3</sub> (10 мл) + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (3 мл) после извлечения из микроволновой системы + H <sub>2</sub> O (87 мл)	0,5	100
8	HNO <sub>3</sub> (10 мл) + H <sub>2</sub> O (90 мл) после микроволновой экстракции)	0,5	100

Рассчитанная для каждого типа экстракции концентрация тяжелых металлов в стандартном образце почвы ГОСТ 7185-95 по формуле 1 представлена в табл. 3.

Таблица 3

Средняя концентрация элемента в стандартном образце почвы, мг/кг

Table 3

Average concentration of the element in a standard soil sample, mg/kg

Химический элемент и выбранная к нему аналитическая линия, нм	Средняя концентрация элемента в образце почвы по трем измерениям, мг/кг								
	Проба 1	Проба 2	Проба 3*	Проба 4*	Проба 5*	Проба 6	Проба 7*	Проба 8	
Ag	328,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Al	396,1	54648,0	87627,0	54748,1	118820	74957,2	53161,3	19952	18104,6
B	208,9	60,7300	75,1500	40,8300	131,080	67,7700	0,0000	6,7800	0,8200
Ba	455,4	3403,20	6055,46	3379,40	8005,30	4558,79	3511,38	1235,32	1112,88
Bi	306,7	0,0000	0,0000	0,0000	24,380	38,2900	45,0300	31,1100	8,8900
Ca	315,8	14983,9	3988,31	2310,18	25783,2	30559,5	23022,5	2604,42	5006,62
Cd	214,4	1,1700	1,7500	1,0500	2,5500	1,4900	2,6300	1,0400	0,8900
Co	228,6	2,2200	21,3700	19,8900	63,2700	38,9700	33,1400	9,7100	1,0200
Cr	267,7	0,0000	65,280	41,2200	237,670	216,570	128,910	27,6700	0,0000
Cu	324,7	33,1100	58,3900	25,5900	70,3600	46,2900	27,0300	9,9600	8,8900
Fe	259,9	38607,1	59958,7	39551,1	73659,1	56592,7	37624,2	13338,8	12433,1
Ga	294,3	17,750	30,010	17,450	45,1500	25,430	15,140	6,1300	5,6400
Hg	184,9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
In	230,6	2,9200	6,4200	2,2200	6,0900	8,5700	1,1400	0,0000	0,0000
K	766,4	10480,7	16300,4	9937,43	21334,9	12000,2	9643,80	3872,89	3467,63

Химический элемент и выбранная к нему аналитическая линия, нм		Средняя концентрация элемента в образце почвы по трем измерениям, мг/кг							
		Проба 1	Проба 2	Проба 3*	Проба 4*	Проба 5*	Проба 6	Проба 7*	Проба 8
Li	670,7	49,0500	86,9500	51,3000	136,280	67,4300	43,940	15,2700	14,4200
Mg	285,2	9368,38	14944,5	9447,86	20262,4	13185,4	8487,76	3110,77	2887,19
Mn	257,6	1584,40	2790,77	1627,87	3832,41	2585,50	1452,89	523,770	476,260
Na	589,5	817,92	558,070	0,0000	5189,76	843,870	0,0000	0,0000	0,0000
Ni	231,6	61,1400	95,7700	41,3800	127,420	78,280	45,890	8,0200	13,5600
Pb	220,3	0,0000	98,6900	0,0000	172,85	78,2800	8,0000	0,0000	0,0000
Se	196,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
V	310,2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
As	189,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Sb	206,8	0,0000	0,0000	36,3400	52,4100	20,9100	738,960	0,0000	0,0000
Sn	235,4	5211,14	9885,87	4770,77	15995,5	10784,3	19197,6	7028,33	6477,62
Sr	407,7	78,2500	143,650	29,2000	208,860	110,860	82,8600	27,7800	25,1100
Tl	190,8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Zn	213,8	136,530	263,010	159,330	386,140	250,850	159,770	25,4900	42,5300

На рис. 1 и 2 графически представлено влияние типа экстракции на извлечение химических элементов из исследуемой пробы стандартного образца почвы.

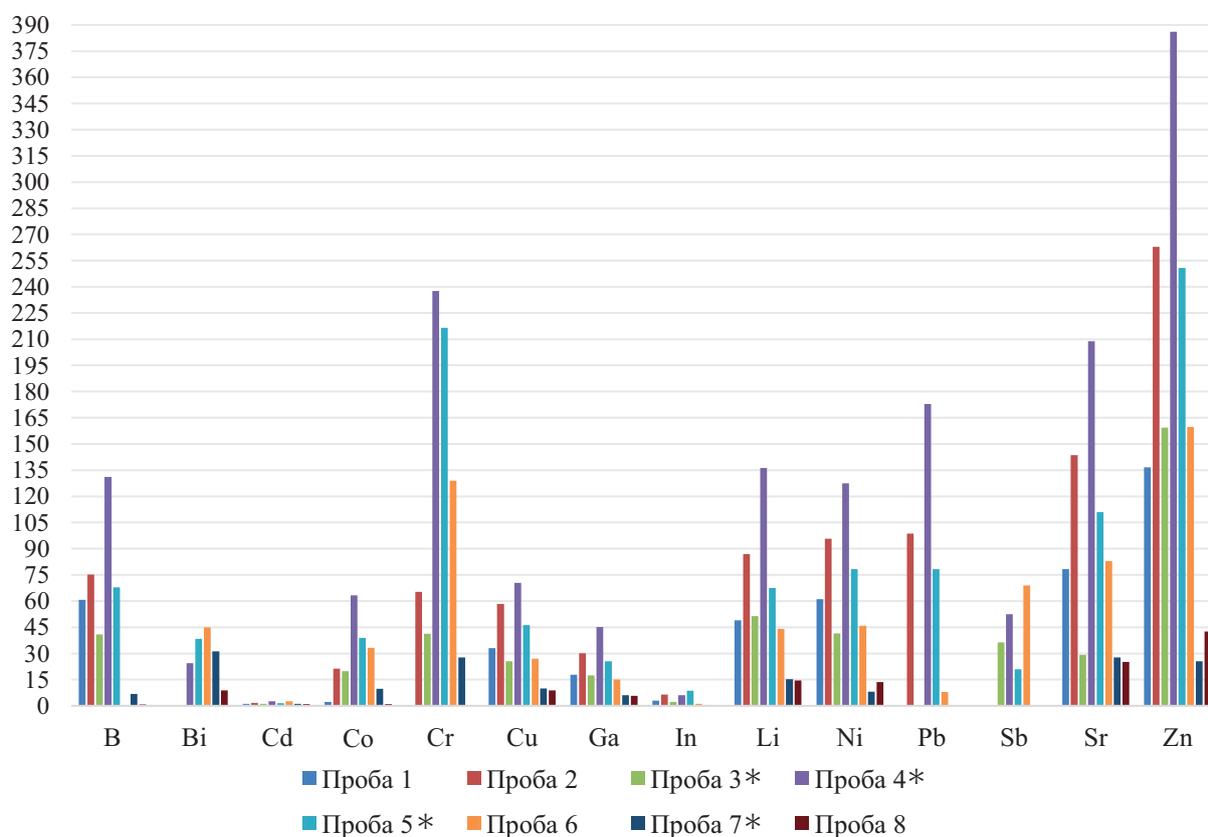


Рис. 1. Содержание химических элементов в стандартном образце почвы в зависимости от вида экстракции (концентрация менее 390 мг/кг)

Fig. 1. Content of chemical elements in a standard soil sample depending on the type of extraction (concentration of less than 390 mg/kg)

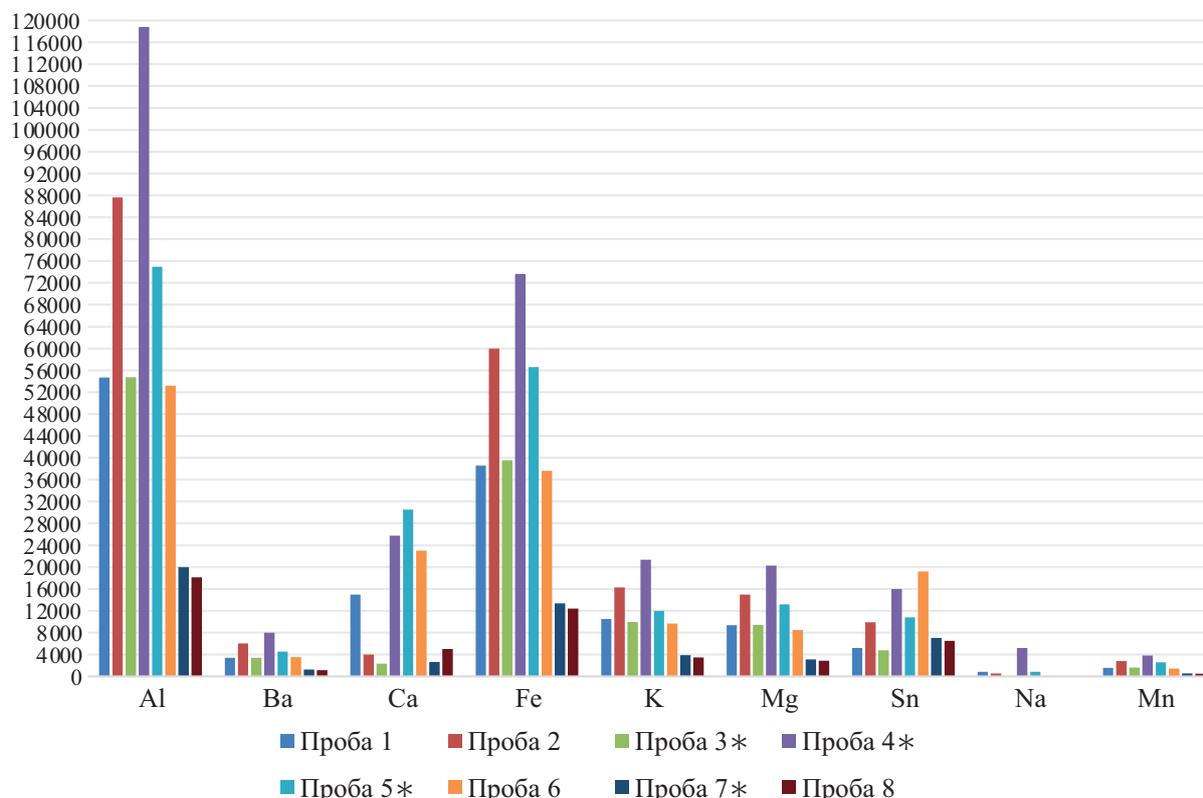


Рис. 2. Содержание химических элементов в стандартном образце почвы в зависимости от вида экстракции (концентрация более 390 мг/кг)

Fig. 2. Content of chemical elements in a standard soil sample depending on the type of extraction (concentration of more than 390 mg/kg)

Для проверки точности измерения прибора, чистоты лабораторной посуды и определения фонового значения применяемых реагентов были проанализированы холостые пробы и лабораторный контрольный образец (ЛКО) (табл. 4).

Таблица 4

Результаты контроля фона химических элементов в реагентах

Table 4

Results of background control of chemical elements in reagents

Химический элемент и выбранная к нему аналитическая линия, нм		Средняя концентрация элемента в холостых образцах и ЛКО, по трем измерениям, мг/л							
		H <sub>2</sub> O 1 класса	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 30 %	HNO <sub>3</sub> (1 %)	HNO <sub>3</sub> +HCl+H <sub>2</sub> O	HNO <sub>3</sub> (х. ч.) 65 %	HCl (х. ч.) 37 %	HNO <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O	ЛКО (1 мг/л)
Ag	328,0	0,0000	0,0000	1,7450	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,9542
Al	396,1	0,0000	0,0235	0,1188	0,0233	0,0229	0,0855	0,0148	1,0212
B	208,9	0,0020	0,0423	0,0451	0,0000	0,0164	0,0205	0,0000	1,2349
Ba	455,4	0,0000	0,0000	0,5092	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,1918
Bi	306,7	0,1915	0,0162	0,0639	0,0997	0,0000	0,0000	0,0988	1,2181
Ca	315,8	0,0000	0,0000	25,180	22,870	0,0000	37,280	45,630	1,3845
Cd	214,4	0,0000	0,0000	0,0002	0,0001	0,0004	0,0003	0,0000	1,1117
Co	228,6	0,0000	0,0002	0,0000	0,0119	0,0008	0,0033	0,0372	1,1550
Cr	267,7	0,0000	0,0224	0,1195	0,0822	0,0000	0,1165	0,1938	1,1745
Cu	324,7	0,0005	0,0017	0,0025	0,0051	0,0030	0,0062	0,0003	1,2715

Химический элемент и выбранная к нему аналитическая линия, нм		Средняя концентрация элемента в холостых образцах и ЛКО, по трем измерениям, мг/л							
		H <sub>2</sub> O 1 класса	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 30 %	HNO (1 %)	HNO <sub>3</sub> +HCl+ H <sub>2</sub> O	HNO <sub>3</sub> (х. ч.) 65 %	HCl (х. ч.) 37 %	HNO <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O	ЛКО (1 мг/л)
Fe	259,9	0,0000	0,1753	0,0691	0,1828	0,0413	0,5947	0,0451	1,1312
Ga	294,3	0,0000	0,0000	0,0012	0,0015	0,0005	0,0004	0,0006	1,1358
Hg	184,9	0,0000	0,0000	0,0374	0,0000	0,1328	0,0000	0,0000	1,1616
In	230,6	0,0000	0,0000	0,0019	0,0000	0,0020	0,0000	0,0000	1,1061
K	766,4	0,0000	0,1037	0,0428	0,0387	0,2694	0,1418	0,0018	0,9342
Li	670,7	0,0000	0,0001	0,0002	0,0013	0,0000	0,0053	0,0010	1,0748
Mg	285,2	0,0000	0,1709	0,1185	0,1352	0,0153	0,2914	0,1766	1,1771
Mn	257,6	0,0000	0,0311	0,0023	0,0035	0,0063	0,0090	0,0047	1,2657
Na	589,5	0,0013	1,4680	0,0184	6,4170	0,2522	6,4170	0,0033	0,9560
Ni	231,6	0,0001	0,0117	0,0024	0,0136	0,0040	0,0529	0,0023	1,2256
Pb	220,3	0,0000	0,0000	0,2087	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,3303
Se	196,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,2333
V	310,2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,1271
As	189,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,9251
Sb	206,8	0,0000	0,0024	0,0383	0,0000	0,0564	0,2210	8,0120	1,1077
Sn	235,4	0,0000	0,0165	0,0592	2,4720	0,1572	0,2722	0,0539	1,0732
Sr	407,7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0963	0,0000	0,0000	0,0000	0,7129
Tl	190,8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,1750
Zn	213,8	0,0020	0,0054	0,0252	0,0000	0,0090	0,1503	0,0272	1,2128

Таблица 5

Схема эксперимента с типами экстракции

Table 5

Experimental scheme with extraction types

Проба	Вид экстракции	Количество образца почвы	Конечный объем исследуемой пробы
1	0,5 г + 2,5 мл HNO <sub>3</sub> + 7,5мл HCl+ 90 мл H <sub>2</sub> O (после извлечения из микроволновой системы)	0,5 г	100 мл
2	0,5 г + 10 мл HNO <sub>3</sub> + 90 мл H <sub>2</sub> O (после извлечения из микроволновой системы)	0,5 г	100 мл
3	0,5 г + 10 мл HNO <sub>3</sub> + 3 мл H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (после извлечения из микроволновой системы) + 87 мл H <sub>2</sub> O	0,5 г	100 мл
4	0,5 г + 2,5 мл HNO <sub>3</sub> + 7,5мл HCl + 3 мл H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (после извлечения из микроволновой системы) + 87 мл H <sub>2</sub> O	0,5 г	100 мл

Рассчитанная (формула 1) для каждого типа экстракции концентрация тяжелых металлов в образцах почвы, отобранных около подземного перехода станции метро Автозаводская, представлена в табл. 6.

Таблица 6

Средняя концентрация элемента в образце почвы, мг/кг

Table 6

Average concentration of the element in the soil sample, mg/kg

Химический элемент	Выбранная аналитическая линия, нм	Средняя концентрация элемента в анализируемых пробах с учетом разбавления, мг/кг			
		Проба 1	Проба 2	Проба 3*	Проба 4*
Ag	328,0	491,7264	241,3065	0,0000	0,0000
Al	396,1	93323,41	63688,08	73289,82	73306,66
B	208,9	119,6627	77,0675	0,0000	0,0000
Ba	455,4	7262,969	1967,302	2508,161	2508,161
Bi	306,7	201,881	198,711	198,909	200,693
Ca	315,8	10514,9	1247,143	23342,5	9244,9
Cd	214,4	4,1605	2,5755	2,9718	3,1699
Co	228,6	0,0000	4,9529	7,9247	0,0000
Cr	267,7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cu	324,7	33,6799	14,0663	14,0663	23,5759
Fe	259,9	53600,4	39697,1	44560,3	44833,1
Ga	294,3	26,5477	18,2268	20,8023	22,5853
Hg	184,9	88,3602	0,0000	0,0000	0,0000
In	230,6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
K	766,4	9436,71	7079,31	8042,76	8115,86
Li	670,7	52,8972	35,2648	40,6140	41,2083
Mg	285,2	8951,72	7528,05	8843,74	8761,72
Mn	257,6	2134,31	1589,10	1751,16	1748,78
Na	589,5	762,750	0,000	0,000	2376,810
Ni	231,6	52,5010	20,2079	0,5944	22,9816
Pb	220,3	1269,93	0,0000	0,0000	0,0000
Se	196,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
V	310,2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
As	189,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Sb	206,8	0,0000	1064,88	1130,06	0,0000
Sn	235,4	27510,7	15488,8	18289,2	23079,8
Sr	407,7	121,2476	0,0000	0,0000	49,7274
Tl	190,8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Zn	213,8	254,382	227,438	238,929	185,041

На рис. 3 и 4 графически представлено влияние типа экстракции на извлечение химического элемента из исследуемой пробы почвы.

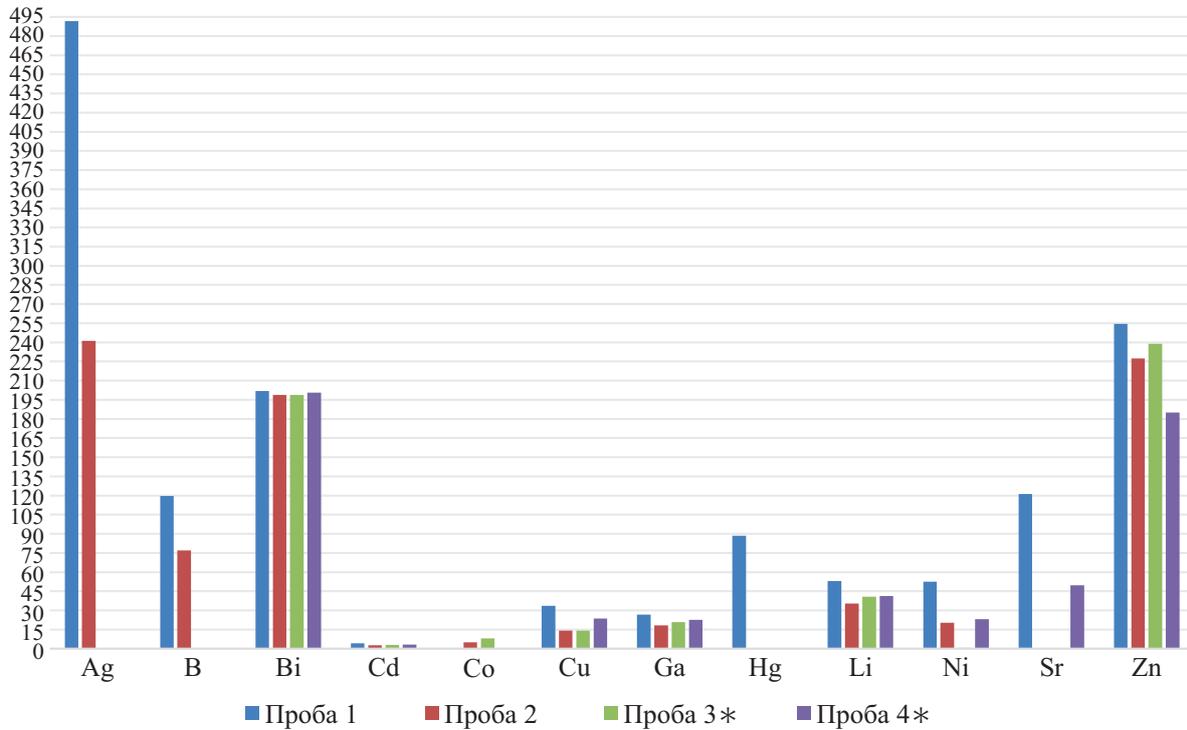


Рис. 3. Химические элементы пробы в зависимости от вида экстракции (концентрация менее 495 мг/кг)

Fig. 3. Chemical elements of the sample depending on the type of extraction (concentration of less than 495 mg/kg)

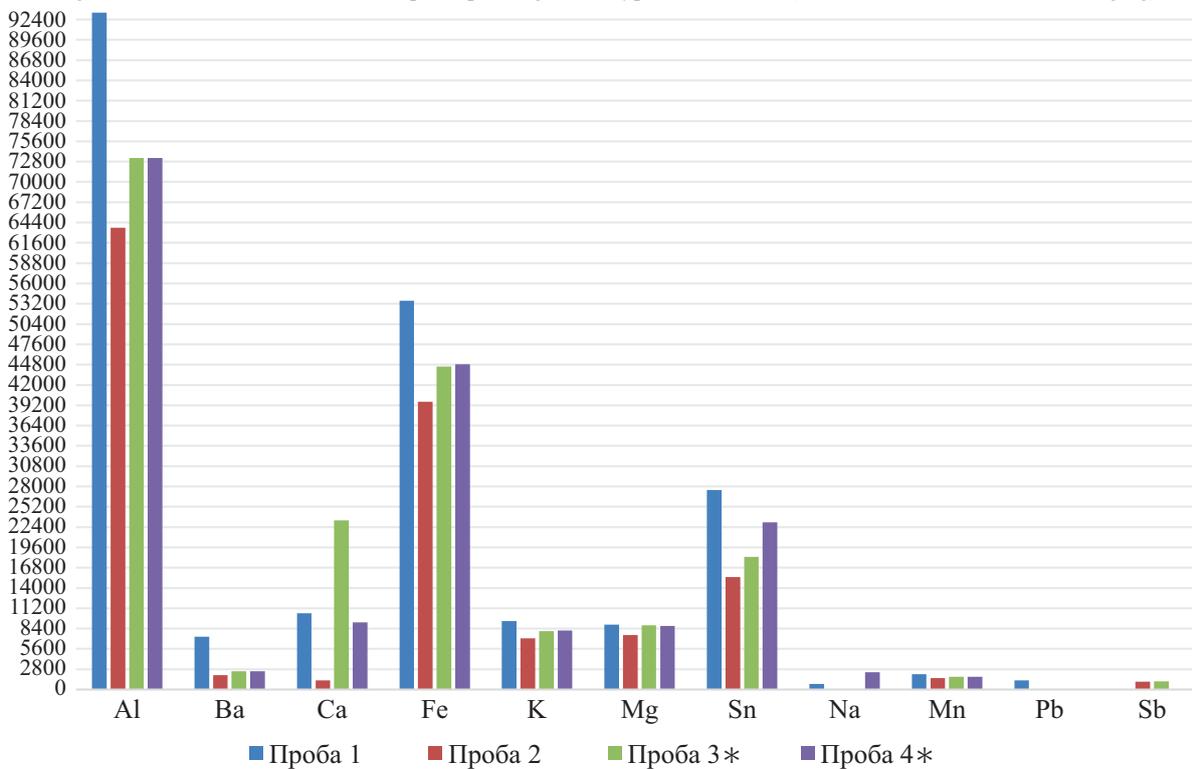


Рис. 4. Химические элементы пробы в зависимости от вида экстракции (концентрация более 495 мг/кг)

Fig. 4. Chemical elements of the sample depending on the type of extraction (concentration of more than 495 mg/kg)

### Закключение

В ходе проведения исследований установлено, что наиболее эффективным способом экстракции тяжелых металлов (химических элементов) из почвы в раствор является экстракция с использованием метода

разложения царской водкой, который позволяет перевести в раствор Ag, Al, As, B, Ba, Bi, Ga, In, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Sr, Tl, V, Zn.

Метод разложения тяжелых металлов (химических элементов) азотной кислотой дает приемлемые результаты разложения для оценки загрязнения почв тяжелыми металлами (Ag, Al, As, B, Ba, Bi, Ga, In, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Sr, Tl, V, Zn) и может применяться при отсутствии иных альтернатив пробоподготовки. Экстракция проб в азотной кислоте при добавлении 30%-ной перекиси водорода существенно повышает окислительные способности азотной кислоты и позволяет исключить загрязнение проб посторонними веществами.

### Библиографические ссылки

1. Илларионова ЕА, Сыроватский ИП, Митина АЭ. *Химико-токсикологический анализ тяжелых металлов*. Иркутск: ИГМУ; 2022. 63 с.
2. Галева ЭИ Холин КВ, Нefeldьев ЕС. Возможности атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. *Вестник Казанского технологического университета*. 2013;9:63–64.
3. Kaltrina J, et al. Determination of heavy metals by ICP-AES in the agricultural soils surrounding Kosovo's power plants. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2016;25(5):1312–1320.
4. Mohammadi A, Faraji M, Mansour SN, Abdolahnejad A, Miri M. Spatial analysis of heavy metals in surface soil, NW Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2020;103(1):1–10.
5. Nyika JA, Onyari E, Dinka MO, Mishra SB. Comparison of Reproducibility of Inductively Coupled Spectrometric Techniques in Soil Metal Analyses. *Air, Soil and Water Research*. 2019;12:1–9.
6. Elsheikh MA, Mahmoud MHH, Momen AA. Determination of Selected Toxic Trace Elements in Agricultural Soil and Wells Water Samples by ICP-OES. *Oriental journal of chemistry*. 2017;33(5):2263–2270.
7. Ahmad W, Alharthy RD, Ahmed ZM. Toxic and heavy metals contamination assessment in soil and water to evaluate human health risk. *Scientific Reports*. 2021;1:1–11.
8. Водяницкий ЮН, Ладонин ДВ, Савичев АТ. *Загрязнение почв тяжелыми металлами*. Москва: Россельхозакадемия; 2012. 304 с.

### References

1. Illarionova EA, Syrovatsky IP, Mitina AE. *Khimiko-toksikologicheskii analiz tyazhelykh metallov* [Chemical-toxicological analysis of heavy metals]. Irkutsk: IGMU; 2022. 63 p. Russian.
2. Galeva EI, Kholin KV, Nefediev ES. *Vozmozhnosti atomno-emissionnoi spektrometrii s induktivno-svyazannoi plazmoi* [Possibilities of atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma]. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2013;9:63–64. Russian.
3. Kaltrina J, et al. Determination of heavy metals by ICP-AES in the agricultural soils surrounding Kosovo's power plants. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2016;25(5):1312–1320.
4. Mohammadi A, Faraji M, Mansour SN, Abdolahnejad A, Miri M. Spatial analysis of heavy metals in surface soil, NW Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2020;103(1):1–10.
5. Nyika JA, Onyari E, Dinka MO, Mishra SB. Comparison of Reproducibility of Inductively Coupled Spectrometric Techniques in Soil Metal Analyses. *Air, Soil and Water Research*. 2019;12:1–9.
6. Elsheikh MA, Mahmoud MHH, Momen AA. Determination of Selected Toxic Trace Elements in Agricultural Soil and Wells Water Samples by ICP-OES. *Oriental journal of chemistry*. 2017;33(5):2263–2270.
7. Ahmad W, Alharthy RD, Ahmed ZM. Toxic and heavy metals contamination assessment in soil and water to evaluate human health risk. *Scientific Reports*. 2021;1:1–11.
8. Vodyanitsky YN, Ladonin DV, Savichev AT. *Zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami* [Soil pollution with heavy metals]. Moscow: Russian Agricultural Academy; 2012. 304 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 11.01.2024.  
Received by editorial board 11.01.2024.

УДК 504.064

## ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ В ВОЗДУХЕ ГОРОДОВ БЕЛАРУСИ

А. Н. АКИМОВ<sup>1)</sup>, А. М. ЛЮДЧИК<sup>1)</sup>, Е. А. МЕЛЬНИК<sup>2)</sup>, П. Н. ПАВЛЕНКО<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы,  
Белорусский государственный университет,  
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю  
радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды,  
пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь

<sup>3)</sup>Белорусский национальный технический университет,  
пр. Партизанский, 77, 220107, г. Минск, Беларусь

Анализируются некоторые особенности загрязнения воздуха на основании данных автоматических пунктов наблюдений Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды за содержанием частиц в воздухе областных городов Беларуси и Березинского биосферного заповедника за период 2012–2022 гг. Среднесуточные концентрации частиц зависят не только от интенсивности местных источников загрязнений, но и от переноса из близких и удаленных регионов. Поэтому метеорологические условия играют определяющую роль в уровне загрязнения воздуха мелкими частицами: они могут способствовать рассеянию частиц, выбрасываемых местными источниками, и доставке частиц, выброшенных в воздух в удаленных от места наблюдений регионах. Последние ситуации относительно редки, однако часто связаны с очень высоким уровнем загрязнения воздуха частицами. В Беларуси максимальные среднемесячные концентрации частиц регистрируются в основном в весенние месяцы. Причина весеннего максимума не выявлена. Самые высокие уровни загрязнения воздуха частицами наблюдаются в Минске и Гомеле, которые являются также и лидерами по газовым загрязнениям в Беларуси. Самые низкие – в Бресте, Гродно, Витебске и Могилеве. Однако Брест занимает третье место после Гомеля и Минска по газообразным загрязнениям воздуха. Это подтверждает выводы других публикаций о том, что концентрация частиц не может служить достоверной оценкой общей загрязненности воздуха. Заметные изменения (падение) концентрации частиц с годами выявлены в Минске только на одном пункте наблюдений. На других пунктах существенных изменений с годами не произошло. То же самое можно сказать и о других областных городах, за исключением Бреста, где в последние годы регистрируется рост концентраций частиц в приземном воздухе.

**Ключевые слова:** частицы в воздухе; метеорологические условия; антропогенное загрязнение воздуха.

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность сотрудникам Республиканского Центра по гидрометеорологии, предоставившим информацию для анализа и активно участвовавшим в ее обсуждении.

### Образец цитирования:

Акимов АН, Людчик АМ, Мельник ЕА, Павленко ПН. Твердые частицы в воздухе городов Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;1:70–81.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-70-81>

### For citation:

Akimov AN, Liudchik AM, Melnik AA, Paulenka PN. Particulate matter in the air of cities in Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;1:70–81. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-70-81>

### Авторы:

**Александр Николаевич Акимов** – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник; заведующий лабораторией средств автоматизации.

**Александр Маркович Людчик** – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий лабораторией физики атмосферы.

**Елена Александровна Мельник** – ведущий инженер-химик службы экологической информации.

**Павел Николаевич Павленко** – старший преподаватель кафедры безопасности технологических процессов в производстве.

### Authors:

**Aleksandr N. Akimov**, PhD (physics and mathematics); senior researcher; head of the laboratory of automation.

[alex\\_akimov@mail.ru](mailto:alex_akimov@mail.ru)

**Alexander M. Liudchik**, PhD (physics and mathematics), docent; head of the laboratory of atmospheric physics.

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

**Alena A. Melnik**, lead chemical engineer at the department of environmental information.

[kbb@rad.org.by](mailto:kbb@rad.org.by)

**Pavel N. Paulenka**, senior lecturer at the department of safety of technological processes in production.

[pavlenko\\_pn@mail.ru](mailto:pavlenko_pn@mail.ru)

## PARTICULATE MATTER IN THE AIR OF CITIES IN BELARUS

A. N. AKIMOV<sup>a</sup>, A. M. LIUDCHIK<sup>a</sup>, A. A. MELNIK<sup>b</sup>, P. N. PAULENKA<sup>c</sup>

<sup>a</sup>National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University,  
7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus

<sup>b</sup>Republican Center for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring,  
110 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220114, Belarus

<sup>c</sup>Belarusian National Technical University,  
77 Partyzanski Avenue, Minsk 220107, Belarus

Corresponding author: A. N. Akimov (alex\_akimov@mail.ru)

Some features of air pollution are analyzed based on data from automatic observation sites of Republican center for hydrometeorology, control of radioactive contamination and environmental monitoring on the content of particles in the air of regional cities of Belarus and the Berezinsky Biosphere Reserve for the period 2012–2022. Average daily particle concentrations depend not only on the intensity of local pollution sources, but also on transportation from nearby and distant regions. Meteorological conditions therefore play a decisive role in the level of fine particle air pollution: they can contribute to the dispersion of particles emitted by local sources and the delivery from distant regions particles emitted into the air. The latter situations are relatively rare, but often connected with high levels of particulate air pollution. In Belarus, maximum monthly average particle concentrations are recorded mainly in the spring months. The cause of the spring maximum has not been identified. The highest levels of air pollution by particles are observed in Minsk and Gomel, which are also the leaders in gas pollution in Belarus. The lowest ones are in Brest, Grodno, Vitebsk and Mogilev. However, Brest ranks third after Gomel and Minsk in terms of gaseous air pollution. This confirms the findings of other publications that particle concentration cannot be a reliable estimate of overall air pollution. Noticeable changes (decrease) in particle concentration over the years were detected in Minsk at only one observation site. At other sites there have been no significant changes over the years. The same can be said about other regional cities with the exception of Brest, where in recent years an increase in particle concentrations in the ground air has been recorded.

**Keywords:** particulate matter; meteorological conditions; anthropogenic air pollution.

**Acknowledgments.** The authors are grateful to the employees of Belhydromet, who provided information for analysis and actively participated in its discussion.

### Введение

В представленном исследовании анализируются сезонные изменения концентраций частиц в воздухе Беларуси. В русскоязычной научной литературе для этого используется термин «твердые частицы в воздухе» как результат изначально неудачного перевода с английского «particulate matter (PM)» – термина, обозначающего *твердые* и *жидкие частицы*, находящиеся в воздухе [1]. Например, капельки воды в тумане попадают под определение «particulate matter», а название «твердые частицы» явно не согласуется с таким «содержанием». Далее авторы будут пользоваться термином «частицы» без прилагательного и общепринятым обозначением PM. Концентрации частиц измеряются вблизи поверхности земли. Следует также указать на разницу между понятиями «particulate matter» и аэрозоль. В последнем случае это частицы (PM) в смеси с газовой средой, в которой они находятся. Понятно также, что повышение концентрации частиц в воздухе, которые поглощают или рассеивают электромагнитное излучение, коррелирует с увеличением аэрозольной составляющей оптической толщины атмосферы.

Частицы относятся к загрязнителям атмосферного воздуха, оказывают вредное воздействие (особенно частицы антропогенного происхождения) на живые организмы и влияют на климат [1–4]. Поэтому актуален их мониторинг с целью предотвращения опасного неконтролируемого загрязнения воздуха. Особенно это важно для городов, где концентрации частиц обычно весьма высоки.

Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) установлены допустимые уровни среднесуточных концентраций частиц в воздухе: 50 мкг/м<sup>3</sup> для частиц PM<sub>10</sub> меньше 10 мкм в аэродинамическом диаметре и 25 мкг/м<sup>3</sup> для частиц PM<sub>2,5</sub> меньше 2,5 мкм (более подробная информация представлена в [2–4]). Считается [2], что более вредными для живых организмов являются частицы меньшего размера. Установлены также критерии для среднегодовых суточных значений – 20 и 10 мкг/м<sup>3</sup> соответственно.

В связи с высоким уровнем загрязнения воздуха частицами в некоторых странах эти критерии смещены в большую сторону. В частности, в Китае, Индии и США для частиц PM<sub>10</sub> допустимыми среднесуточными концентрациями являются 150, 100 и 150 мкг/м<sup>3</sup> соответственно [2]. В Беларуси [5] для среднесуточных значений предельно допустимых концентраций (ПДК) PM<sub>10</sub> приняты рекомендации ВОЗ, для среднегодовых суточных критерии несколько повышены – 40 и 15 мкг/м<sup>3</sup> для PM<sub>10</sub> и PM<sub>2,5</sub> соответственно.

Основными антропогенными источниками попадающих в воздух частиц, как и других загрязняющих веществ, являются транспорт, фабрики, нефтеперерабатывающие заводы и электростанции, строительные площадки, а также сельское хозяйство и добыча полезных ископаемых. Следует обратить внимание на то, что транспорт не только выбрасывает частицы в процессе сжигания топлива, но и способствует поднятию дорожной пыли. Очень эффективным источником частиц (не всегда «антропогенного происхождения») является сжигание биомассы, например, лесные пожары. Следует также понимать, что мелкие частицы хорошо переносятся на большие расстояния вместе с движением воздушных масс [6]. Подробное исследование зависимости от метеорологических условий и направления ветра уровней загрязнения воздуха частицами в Германии представлено в [7].

Самый загрязненный частицами воздух в 2019 г. был в Каире, Дели, столице Бангладеш Дакке, Калькутте [2], где среднегодовые суточные концентрации частиц меньше 2,5 мкм превышали 80 мкг/м<sup>3</sup>. Однако следует отметить, что во всех этих городах с годами наблюдается постепенное снижение концентраций загрязнений. В то же время, знаменитые в прошлом загрязненностью воздуха такие города, как Лос-Анджелес, Мехико, Лондон сейчас являются относительно чистыми – на уровне Парижа и Москвы. Это произошло в результате предпринятых мер по предотвращению загрязнения воздуха.

В Беларуси наблюдения за концентрацией частиц в воздухе проводятся в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС) и обобщенные результаты ежегодных наблюдений публикуются [8].

В исследовании анализируются некоторые особенности загрязнения воздуха на основании данных автоматических пунктов наблюдений Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (Белгидромета) в 2012–2022 гг. за содержанием частиц в воздухе областных городов Беларуси и Березинского биосферного заповедника.

**Данные наблюдений и их обработка.** Следует отметить, что НСМОС предоставляет только среднесуточные значения концентраций. Ряды данных содержат пропуски, обусловленные объективными причинами, поэтому количество лет, месяцев и дней с результатами измерений на разных пунктах наблюдений различается.

На основании имеющихся данных определены среднеемесячные значения концентраций частиц и их многолетние средние для всех автоматических пунктов наблюдений в областных городах и Березинском биосферном заповеднике. На большинстве пунктов в названных городах измеряются концентрации частиц до 10 мкм, и только на минском пункте 16 (район Уручья) регистрируются частицы размером менее 2,5 мкм.

Следует также пояснить процедуру обработки данных наблюдений. Среднеемесячные значения рассчитываются на основании данных суточных измерений, если число последних превышает 20. Многолетние средние месячных значений определяются на основании имеющихся для конкретного пункта среднеемесячных за весь указанный выше период. Количество лет, использованных для расчета на каждом пункте наблюдений для каждого месяца, указано в табл. 1, а также приведены все действующие в каждом городе пункты (их нумерация никак не связана с количеством).

Таблица 1

Количество лет наблюдений, для которых получены среднеемесячные значения для конкретного месяца года

Table 1

The number of years of observations for which average monthly values were obtained for a specific month of the year

Город, пункт	Количество среднеемесячных значений последовательно для каждого месяца
Березинский заповедник 01	1, 2, 3, 1, 3, 3, 3, 3, 2, 2, 4, 4
Брест 01	2, 4, 6, 6, 6, 6, 4, 5, 4, 4, 3, 2
Гомель 14	6, 5, 6, 6, 5, 4, 7, 5, 3, 6, 7, 7
Гродно 07	5, 7, 7, 6, 7, 5, 5, 4, 4, 4, 5, 7
Могилев 04	4, 7, 6, 6, 6, 6, 7, 7, 7, 7, 7
Могилев 06	4, 4, 3, 2, 3, 4, 4, 4, 3, 4, 3, 2
Витебск 03	7, 6, 9, 5, 6, 5, 5, 5, 4, 5, 4, 7
Минск 01	6, 5, 7, 4, 7, 5, 5, 65, 7, 4, 6
Минск 04	3, 2, 4, 3, 5, 6, 4, 5, 4, 3, 1, 3
Минск 11	4, 3, 8, 4, 7, 8, 4, 6, 4, 6, 6, 4
Минск 13	4, 7, 6, 5, 6, 5, 4, 8, 6, 7, 6, 8
Минск 16 (2,5 мкм)	6, 6, 6, 6, 6, 6, 7, 7, 6, 6, 6, 6

**Среднесуточные концентрации частиц.** На значения суточных концентраций частиц оказывает влияние интенсивность местных источников загрязнений, метеорологические условия и направления движения воздушных масс, приносящих частицы из далеких регионов. Очень многие предприятия прекращают деятельность в выходные дни, что снижает интенсивность выбросов. Метеорологические условия также влияют на уровень загрязнения. Дожди вымывают частицы и опускают их на землю, безветренная сухая погода приводит к их накоплению. Важную роль играет вертикальная устойчивость атмосферы: в условиях, когда вертикальное перемешивание воздуха заторможено (наиболее ярко это проявляется в зимнее время при отсутствии сильного ветра, инициирующего турбулентное перемешивание), то все выбросы загрязнений из местных наземных источников остаются и накапливаются в приземном слое атмосферы.

О суточном ходе концентраций частиц в воздухе на территории Беларуси нет данных, поскольку НСМОС регистрирует только среднесуточные значения. Однако можно предполагать, что он повторяет суточный ход концентраций других загрязняющих веществ [9;10]: утренний и вечерний подъем и спад в дневное и ночное время. Дневной спад происходит из-за интенсификации вертикального перемешивания и усиления ветра, ночной – из-за прекращения деятельности источников. Высказанное предположение подтверждается также и данными других публикаций [11–14], в которых определенно зафиксирован указанный суточный ход концентраций частиц. Сказанное, конечно, не относится к частицам, переносимым вместе с движением воздушных масс от источников, расположенных далеко от места наблюдений. Если такой перенос оказывает определяющее влияние на концентрацию частиц в месте наблюдений, то ожидать заметного суточного хода концентрации не приходится [15].

Значения среднесуточных концентраций меняются ото дня ко дню, и эти вариации чаще всего не связаны с изменением интенсивности источников частиц в месте наблюдений. На рис. 1 приведены данные наблюдений за концентрацией PM10 весной 2020 г. Видно, что корреляцию концентрации с будними и выходными днями выявить весьма затруднительно, хотя такая корреляция весьма часто отмечается в других публикациях [12–14; 16]. Следовательно, основной причиной изменчивости концентраций частиц ото дня ко дню являются в основном метеорологические условия в месте наблюдений и перенос загрязнений с движением воздушных масс.

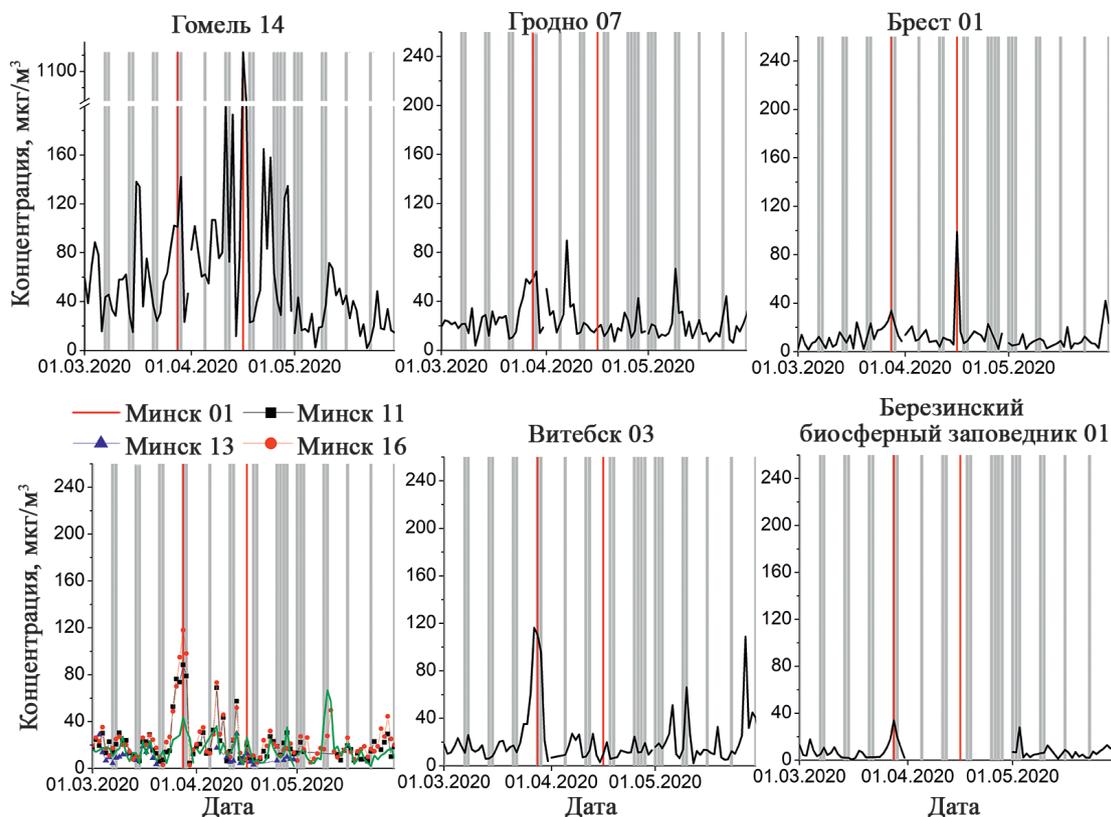


Рис. 1. Среднесуточные концентрации частиц весной 2020 г. Красной вертикальной чертой отмечены даты 28 марта и 16 апреля. В марте среднесуточный максимум регистрировался на всех пунктах наблюдений, в апреле – только в Гомеле (очень высокий, поэтому на шкале ординат сделан разрыв) и в Бресте. Светло-серым цветом обозначены периоды выходных и праздничных дней

Fig. 1. Average daily particle concentrations in the spring of 2020. The dates March 28 and April 16 are marked with a red vertical line. In March, the average daily maximum was recorded at all observation sites, in April – only in Gomel (very high, so there is a break in the ordinate scale) and in Brest. Periods of weekends and holidays are indicated in light gray

Подтверждением такого вывода является синхронное изменение амплитуды колебаний среднесуточных концентраций на всех пунктах наблюдений в Минске (рис. 1). Ясно, что интенсивность локальных источников «не подчиняется» какому-то «общегородскому» закону. Было бы понятно, если бы концентрации частиц уменьшались в выходные дни, как это происходит с концентрациями газообразных загрязнений воздуха [25]. Однако в обсуждаемом случае этого не обнаруживается, в отличие от городов в других странах. Можно предположить, что такая закономерность действительно существует, однако она «теряется» на фоне присутствующих более сильных эффектов, обусловленных переносом и меняющимися метеорологическими условиями.

Синхронное появление максимумов и минимумов концентраций частиц в разных районах города указывает на то, что существенную роль в изменчивости концентраций играет погода и направление движения воздушных масс [17], а не только меняющаяся интенсивность местных источников загрязнений. Иными словами, местные источники частиц в городах, скорее всего, не являются определяющими в рассматриваемых ниже эпизодах высокого уровня загрязнения воздуха частицами в Беларуси.

Особый интерес вызывает очень сильный пик концентраций 16 апреля в Гомеле, когда ПДК была превышена в более чем 20 раз. В это же время был зарегистрирован максимум и в Бресте, правда, не такой сильный, но все же в 2 раза превышающий ПДК. Однако в других городах превышения не обнаружено.

Похожий случай сильного повышения концентраций PM<sub>10</sub> в Португалии 5 августа 2005 г. отмечен в [18]. Авторы указанной статьи объясняют этот эпизод переносом жаркого сухого воздуха из центральной Испании и лесными пожарами в Португалии, а также на юге Испании.

С целью определения причины события 16 апреля нами были исследованы обратные траектории движения воздуха [19] к трем городам Беларуси: Бресту, Гомелю и Минску 15, 16 и 17 апреля 2020 г. (рис. 2).

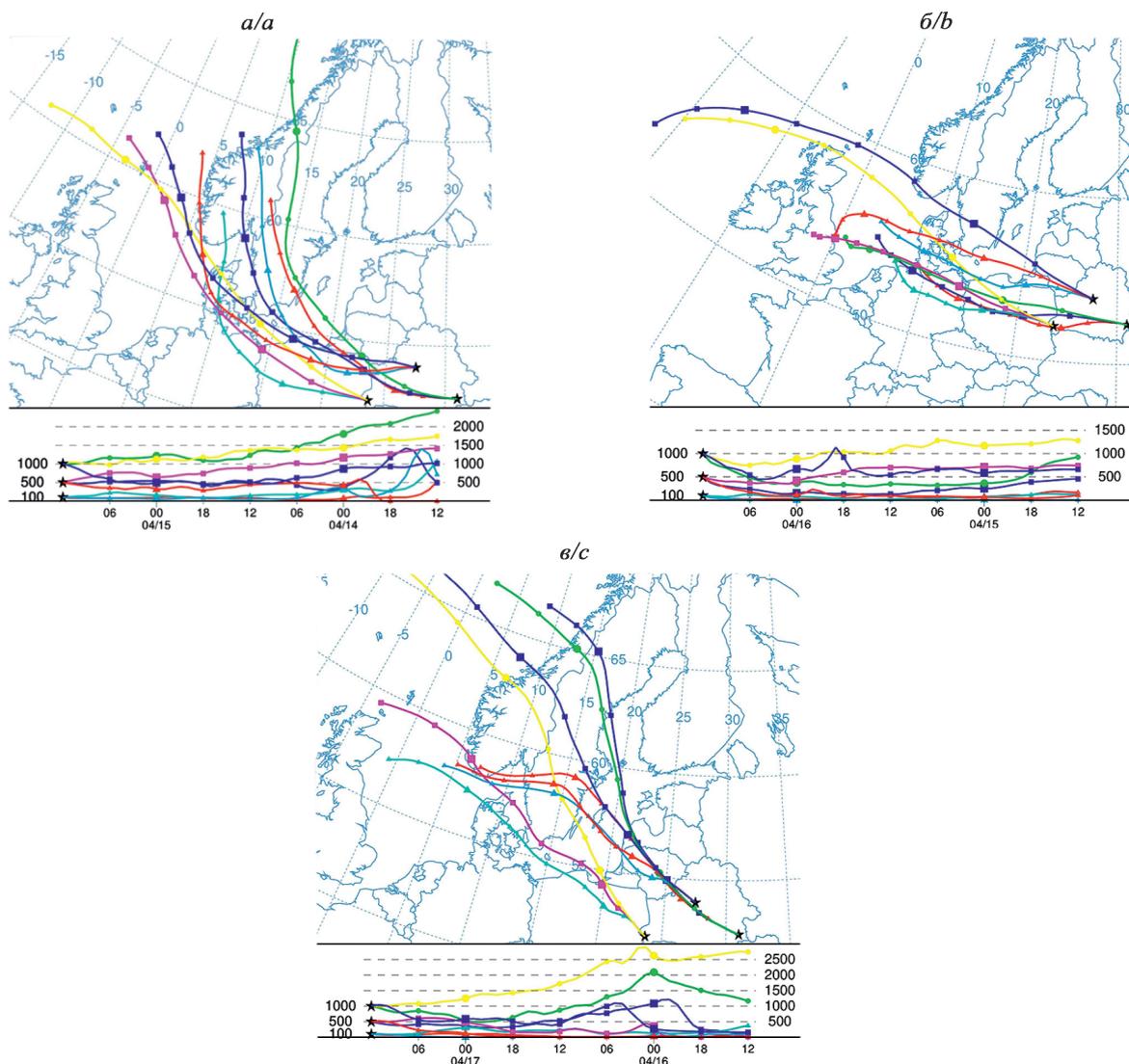


Рис. 2. Траектории движения воздуха к Бресту, Минску и Гомелю: 15 (а), 16 (б), 17 (в) апреля 2020 г.

Fig. 2. Air movement trajectories to Brest, Minsk and Gomel: in April 15 (a), 16 (b), 17 (c) 2020

Накануне события воздух двигался в юго-восточном направлении над Балтийским морем и северными областями Польши ко всем трем городам и не затрагивал территорию Германии. При этом 16 апреля траектории, ведущие в Брест и Гомель, сместились к югу и прошли над севером Германии, где в апреле бушевали сильные лесные пожары на северо-западе страны [20]. В то же время траектория воздуха, движущегося к Минску, сместилась несколько севернее и не затронула охваченные пожаром территории. Наверное, эти различия в траекториях и объясняют разницу в результатах наблюдений в трех городах. Однако уже 17 апреля все траектории резко сместились в северном направлении, и концентрации частиц во всех городах нормализовались.

Остается открытым вопрос, почему концентрации частиц в Бресте 16 апреля оказались намного ниже, чем в находящемся значительно восточнее Гомеле, хотя траектории движения воздуха на пути в Гомель проходили над Брестом? Следует иметь в виду, что концентрации частиц измеряются вблизи поверхности земли. Поэтому возможна ситуация, когда частицы из более высоких слоев воздуха по мере движения с воздушной массой постепенно опускаются к поверхности не только из-за собственной тяжести, но и в результате охлаждения и опускания воздуха, содержащего эти частицы.

Здесь очень могли бы помочь наблюдения за аэрозольной оптической толщиной атмосферы, характеризующей до некоторой степени количество частиц во всей ее толще. Можно было бы ожидать, что аэрозольная оптическая толщина, в отличие от концентрации частиц у поверхности земли, почти не меняется на пути движения воздуха от Бреста к Гомелю в период обсуждаемого события. Однако ни в Бресте, ни в Гомеле такие измерения не ведутся. Сеть AERONET [21], осуществляющая мониторинг аэрозольной оптической толщины атмосферы, имеет только 2 пункта наблюдений в регионе, представляющие интерес: Бяльск (Польша) и Минск (Беларусь). Однако траектории движения воздуха в Брест и Гомель 16 апреля не проходили над этими пунктами.

Помимо сказанного, следует заметить, что в течение всей весны 2020 г. мощные лесные пожары бушевали вблизи северной, восточной и южных границ Беларуси (рис. 3) [22], результаты которых отразились на наблюдениях в Гомеле в виде очень высоких концентраций PM10 по сравнению с другими городами (рис. 1). Это также может служить объяснением резкого различия в концентрациях частиц в Гомеле и в других городах страны весной 2020 г.

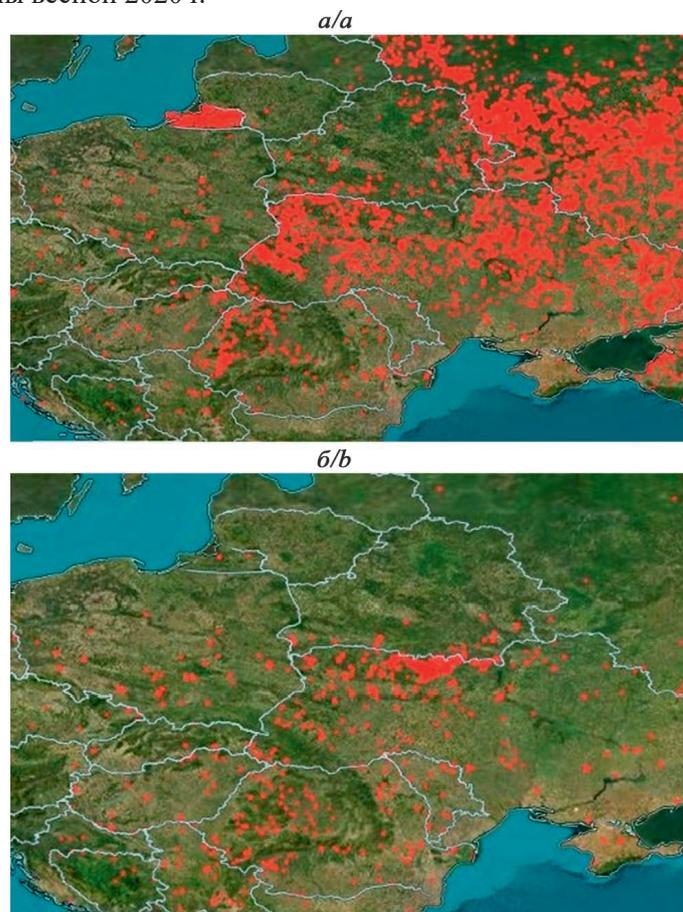


Рис. 3. Карты пожаров весной 2020 г. в Беларуси и вблизи ее границ: а) 28 марта, б) 16 апреля

Fig. 3. Maps of fires in the spring of 2020 in Belarus and near its borders: a) March 28, b) April 16

В частности, 28 марта повышенные концентрации PM<sub>10</sub> фиксировались во всех областных городах и даже в Березинском биосферном заповеднике. В этот период воздух на территорию всей Беларуси поступал с юго-востока (рис. 4) через Гомельскую обл. из районов, охваченных лесными пожарами.

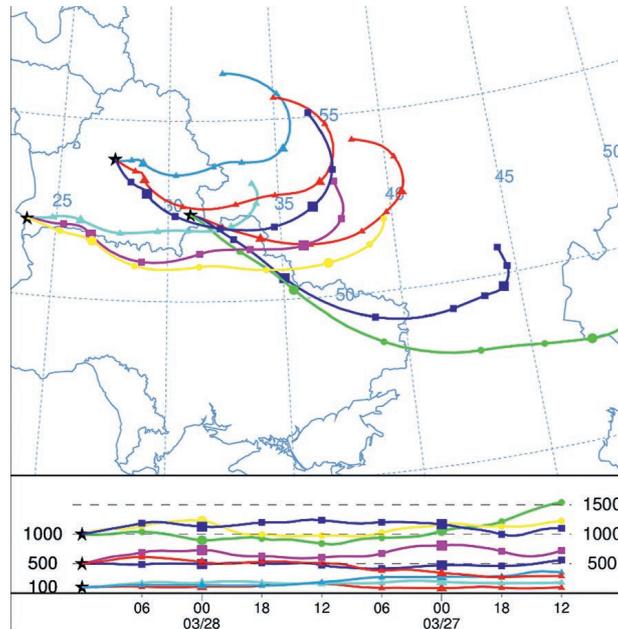


Рис. 4. Траектории движения воздуха в Брест, Минск и Гомель 28 марта 2020 г.

Fig. 4. Air movement trajectories to Brest, Minsk and Gomel on March 28, 2020

Как отмечалось ранее (см. рис. 2), 16 апреля к траектории поменяли направление на противоположное, что привело к очищению воздуха почти всюду, кроме двух городов (Бреста и Гомеля). В первом фиксировались следы пожара на севере Германии, во втором – добавилось усугубляющее «германский эффект» влияние пожара в Чернобыльской зоне (см. рис. 3).

Белгидромет также отмечает существенное усиление пылевых бурь в Гомельской области в апреле 2020 г. [23], широко обсуждавшееся в средствах массовой информации, что является известной проблемой в последние годы для названного района. Поэтому чрезвычайно высокое возрастание количества частиц в воздухе Гомельской обл. в середине апреля 2020 г. логично связать исключительно с местными условиями, а не с трансграничным переносом следов пожаров в Германии.

**Среднемесячные концентрации частиц.** На рис. 5–7 приведены среднемесячные значения концентраций частиц, зарегистрированные на пунктах наблюдений в областных городах и Березинском биосферном заповеднике. Для обозначения данных за 2012–2021 гг. использованы цифры от 0 до 9, за 2022 г. – буква А. Данные за каждый год выделены также индивидуальным цветом.

В Минске на многих пунктах в некоторые годы очень четко проявляется весенний максимум концентраций, приходящийся на март – апрель. Причины его появления не известны. Возможно, это связано с таянием снежного покрова, увеличением интенсивности дорожного движения и поднятием транспортом накопившейся пыли с дорожного покрытия. Такие же весенние максимумы характерны и для других городов. Следует отметить, что весеннее повышение концентраций частиц практически не заметно на Минском пункте 01 (Обсерватория). Также трудно объяснить резкое изменение уровня загрязнения на пункте Минск 13 (Дражня): в первые годы рассматриваемого периода здесь был самый высокий уровень загрязнения в городе, а в последние сильно снизился до уровня концентраций частиц меньших 2,5 мкм (пункт 16 (Уручье)). Концентрации частиц размером до 2,5 мкм всегда ниже, чем в случае до 10 мкм, поскольку первые являются составной частью вторых. Правда, эти концентрации измерялись на другом пункте, поэтому можно только подозревать о проблемах с качеством данных на пункте 13.

В Могилеве (рис. 6) на обоих пунктах наблюдений также можно обнаружить весеннее повышение концентраций частиц, и естественны их более высокие значения в промышленном районе (пункт 04).

Весенний максимум концентрации частиц регистрируют в разных странах, но не везде. В частности, в [24] приведены данные о сезонном ходе концентраций PM<sub>10</sub> в двух районах Афин и Хельсинки. В «чистом» районе Афин весенний максимум проявляется, в более «грязном» – нет. В Хельсинки в районах обоих типов весенние максимумы присутствуют. А в Стамбуле [16], имеющем много пунктов наблюдений, весенние максимумы отсутствуют, и наблюдаются в зимнее время. Такая же ситуация и в Португалии [18].

На рис. 7 приведены среднемесячные концентрации частиц в разные годы в Березинском биосферном заповеднике, Бресте, Гродно, Гомеле и Витебске. Наибольший интерес вызывает отсутствие весеннего максимума в заповеднике. Вместо максимума, за все 3 года наблюдений наблюдается минимум. Концентрации частиц, как и следовало ожидать, ввиду отсутствия сильных местных источников, – самые низкие.

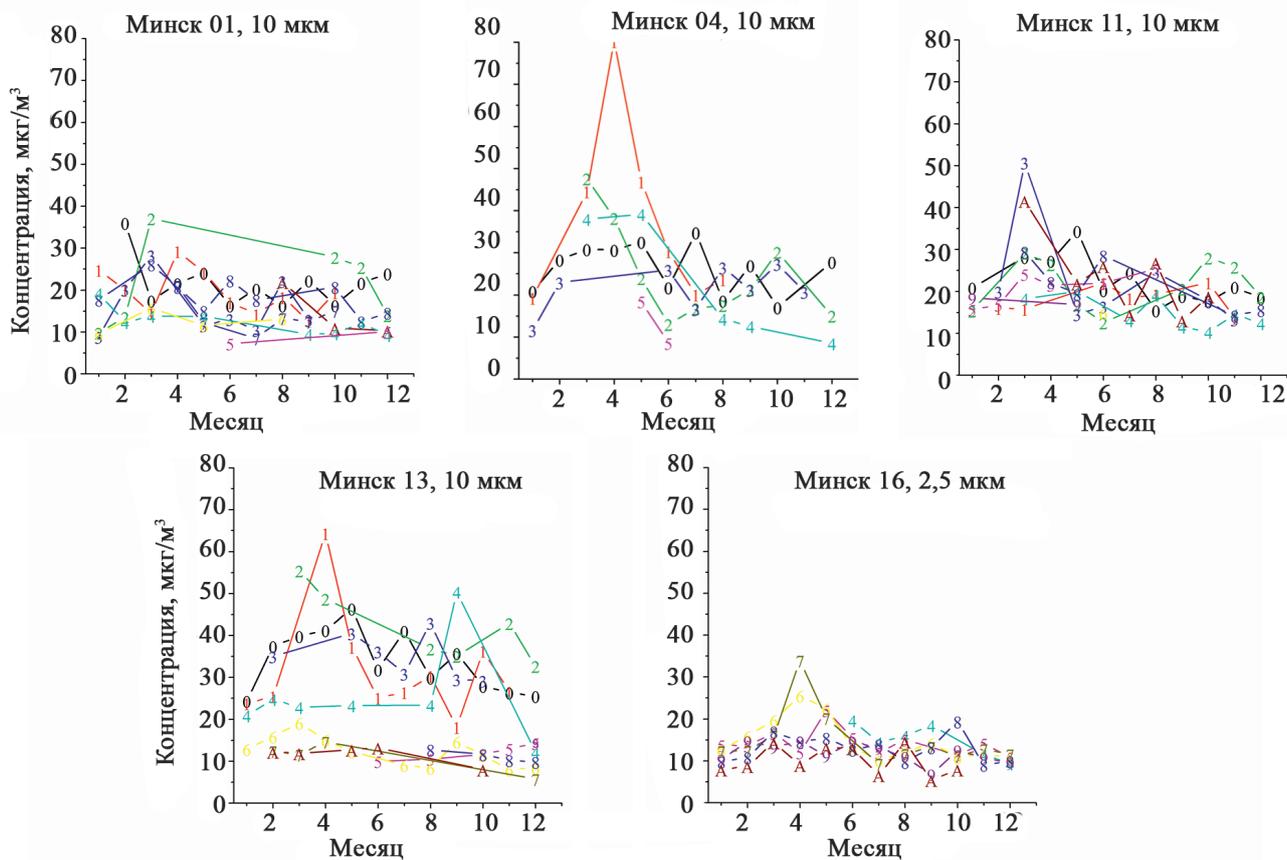


Рис. 5. Среднемесячные концентрации твердых частиц в приземном воздухе в г. Минске в разные годы. На пунктах наблюдений 01, 04, 11, 13 регистрировались частицы до 10 мкм, на пункте 16 – до 2,5 мкм

Fig. 5. Average monthly concentrations of particulate matter in ground air in Minsk in different years. At observation sites 01, 04, 11, 13, particles up to 10 µm were recorded, at site 16 – up to 2.5 µm

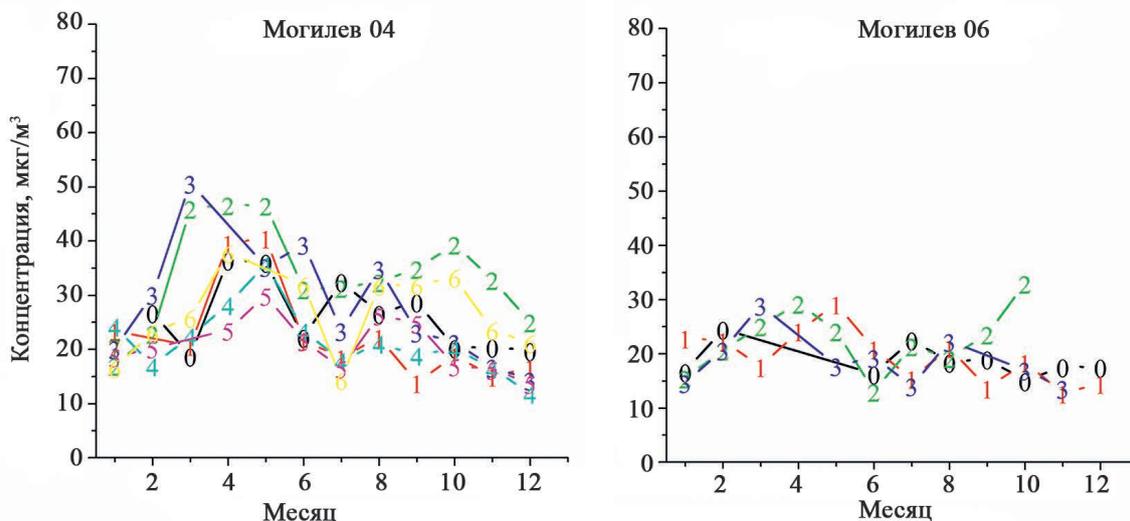


Рис. 6. Среднемесячные концентрации твердых частиц в приземном воздухе в г. Могилеве на пунктах 04 и 06 в разные годы

Fig. 6. Average monthly concentrations of particulate matter in the surface air in the city of Mogilev at sites 04 and 06 in different years

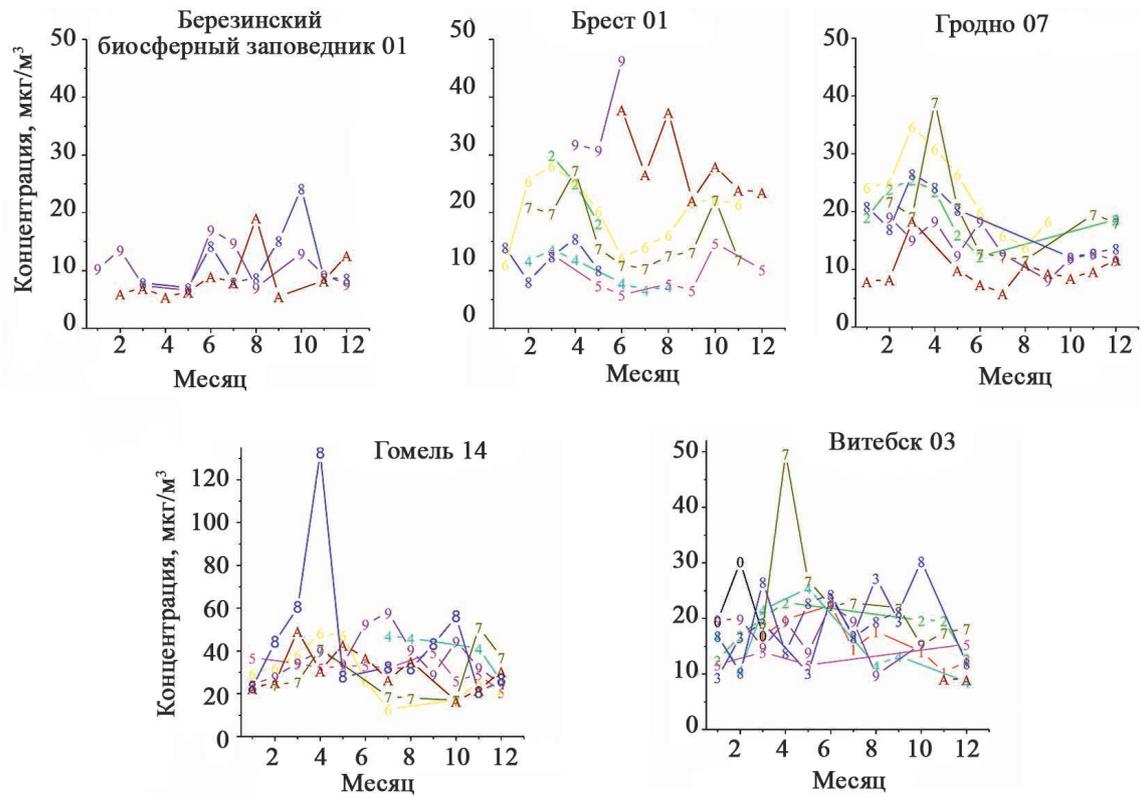


Рис. 7. Среднемесячные концентрации твердых частиц в приземном воздухе в Березинском биосферном заповеднике, Бресте, Гродно, Гомеле и Витебске в разные годы

Fig. 7. Average monthly concentrations of particulate matter in ground air in the Berezinsky Nature Reserve, Brest, Grodno, Gomel and Vitebsk in different years

В Бресте в последние годы (2021 и 2022) замечен рост загрязненности воздуха частицами, а в Гродно – снижение. В Гомеле был очень сильный весенний максимум в 2020 г. (см. рис. 1), и уровень загрязнения в целом выше, чем в других городах. В Гродно и Витебске межгодовые различия невелики. То же наблюдалось и в Гомеле, если исключить апрель 2020 г.

Итак, для городов, где имеется несколько пунктов, на рис. 8 приведены многолетние средние месячные значения концентраций частиц для каждого пункта. В Минске самые высокие концентрации регистрировались на пунктах 04 (район бывшего Радиаторного завода) и 13 (Дражня), а в Могилев – на пункте 04, расположенном в промышленном районе.

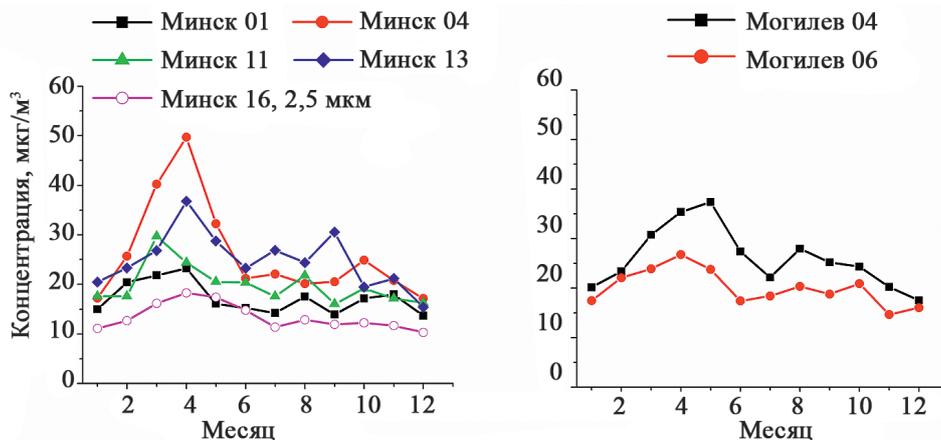


Рис. 8. Многолетние средние месячные значения концентраций твердых частиц в приземном воздухе на разных пунктах наблюдений в Минске и Могилеве. На пункте 16 в Минске измерялись концентрации частиц размером до 2,5 мкм. На всех остальных пунктах – до 10 мкм

Fig. 8. Long-term average monthly values of concentrations of particulate matter in the surface air at different observation sites in Minsk and Mogilev. At site 16 in Minsk, concentrations of particles up to 2.5 microns in size were measured. At all other sites – up to 10 microns

Как уже отмечалось, уровень загрязнения воздуха частицами в конкретном месте формируется за счет местных источников и переноса из удаленных районов. Поэтому разница в концентрациях частиц на разных пунктах наблюдений одного и того же города может служить заниженной оценкой вклада местных источников, а оценку вклада за счет переноса воздуха следует считать несколько меньшей результатов наблюдений в самом чистом районе.

Для Минска и Могилева было определено «городское» среднее значение месячных концентраций посредством осреднения по всем городским пунктам наблюдений для сравнения с другими городами (рис. 9). Отметим, что меньше всего частиц регистрируется в Березинском биосферном заповеднике, не располагающем мощными источниками их выбросов. По уровню загрязнения далее следуют Брест, Гродно и Витебск, затем Могилев и Минск, а самый загрязненный частицами воздух – в Гомеле, в котором многолетнее среднее месячное значение для апреля превышает ПДК. Возможно, это результат учета при расчете многолетних средних месячных значений описанного выше события 16 апреля 2020 г., однако повышенные по сравнению с другими городами многолетние средние для всех других месяцев подтверждают сказанное.

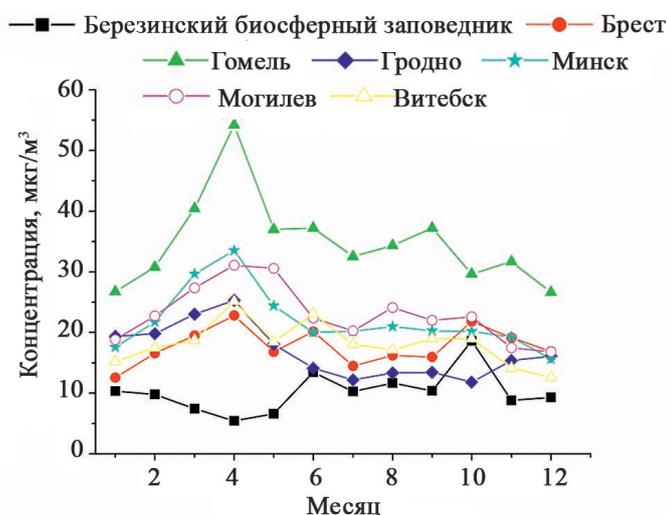


Рис. 9. Многолетние средние месячных концентраций частиц в приземном воздухе в областных городах Беларуси и Березинском биосферном заповеднике. Размер – до 10 мкм

Fig. 9. Long-term average monthly concentrations of particles in surface air in regional cities of Belarus and the Berezinsky Biosphere Reserve. Size – up to 10 microns

Представляет интерес также сравнение многолетних средних месячных концентраций частиц с аналогичными среднемесячными значениями газообразных загрязнений воздуха. В [25] показано, что уровни загрязнения оксидом углерода почти одинаковы во всех городах. Наиболее высокие концентрации диоксида азота в Минске, затем следуют Гомель и Брест, а наиболее низкие в Гродно, Витебске и Могилеве. Самые высокие концентрации оксида азота в Минске и Гомеле, в остальных городах они заметно ниже.

## Заключение

Среднесуточные концентрации частиц зависят не только от интенсивности местных источников загрязнений, но также и от переноса из близких и удаленных регионов. Поэтому метеорологические условия играют определяющую роль в уровне загрязнения воздуха мелкими частицами: они могут способствовать рассеянию частиц, выбрасываемых местными источниками, и доставке частиц, выброшенных в воздух в удаленных от места наблюдений регионах. Последние ситуации относительно редки, однако часто они связаны с очень высоким уровнем загрязнения воздуха частицами. Следует отметить, что неоднократно регистрировались случаи приноса в Беларусь пыли из африканской Сахары [6].

В Беларуси максимальные среднемесячные концентрации частиц регистрируются в основном в весенние месяцы, хотя имеется исключение для Березинского биосферного заповедника. Там измерения показывают локальный минимум. Причина весеннего максимума не выявлена.

Самые высокие уровни загрязнения воздуха частицами наблюдаются в Минске и Гомеле, которые являются также и лидерами по газовым загрязнениям в Беларуси. Самые низкие – в Бресте, Гродно, Витебске и Могилеве. Однако Брест занимает третье место после Гомеля и Минска по газообразным загрязнениям воздуха. Это подтверждает заключение, сделанное в [26], что концентрация частиц не может служить достоверной оценкой общей загрязненности воздуха.

Заметные изменения (падение) концентрации частиц с годами за рассмотренный период выявлены в Минске только в пункте 13. На других пунктах существенных изменений не произошло. То же самое можно сказать и о других областных городах, за исключением Бреста, где в последние годы регистрируется рост концентраций частиц в приземном воздухе.

### Библиографические ссылки

1. Popescu F, Ionel I. Anthropogenic Air Pollution Sources. Chapter 1. In: Air Quality. Tezpur; India: Publisher Sciyo; 2020. 23 p.
2. Molina LT. Introductory lecture: air quality in megacities. *Faraday Discuss.* 2021;226:9–52.
3. Fuzzi S, Baltensperger U, Carslaw K, Decesari S, Denier van der Gon H, Facchini MC, Fowler D, Koren I, Langford B, Lohmann B, Nemitz E, Pandis S, Riipinen I, Rudich Y, Schaap M, Slowik JG, Spracklen DV, Vignati E, Wild M, Williams M and Gilardoni S. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2015; 15: 8217–8299.
4. EEA Report No 10/2019. Air quality in Europe — 2019 report 1994–2019. Luxembourg: European Environmental Agency; 2019.
5. Приложение 1 к постановлению Министерства здравоохранения Республики Беларусь 08.11.2016 № 113. Нормативы предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. [Интернет, процитировано 14 июня 2023]. URL: [https://minzdrav.gov.by/upload/lcfiles/text\\_tnpa/000352\\_132617\\_postan113.pdf](https://minzdrav.gov.by/upload/lcfiles/text_tnpa/000352_132617_postan113.pdf).
6. Божкова ВВ, Болотко ЛМ, Людчик АМ, Метельская НС, Умрейко СД, Чайковский АП. Причины «странного» поведения приземного озона в апреле 2019 г. *Природные ресурсы.* 2020;2:94–103.
7. Spindler G, Grüner A, Müller K, Schlimper S, Herrmann H. Long-term size-segregated particle (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>) characterization study at Melpitz – influence of air mass inflow, weather conditions and season. *Journal of Atmospheric Chemistry.* 2013;70:165–195.
8. Ежегодник состояния атмосферного воздуха. [Интернет, процитировано 14 июня 2023]. URL: <https://rad.org.by/articles/vozduh/>.
9. Божкова ВВ, Бурак РН, Козерук ББ, Людчик АМ, Мельник ЕА. Антропогенное загрязнение воздуха и приземный озон в городах Беларуси. *Природные ресурсы.* 2018;1:92–101.
10. Bozhkova VV, Liudchik AM, Umreika AD. Influence of meteorological conditions on urban air pollution. *Acta Geographica Silesiana.* 2020;14(4):5–21.
11. Gallero FGG, Vallejo MG, Umbria A, Baena JB. Multivariate statistical analysis of meteorological and air pollution data in the ‘Campo de Gibraltar’ region, Spain. *Environmental Monitoring and Assessment.* 2006; 119:405–423. DOI: 10.1007/s10661-005-9033-4.
12. Qu Y, Wang T, Cai Y, Wang Sh, Pulong Chen P, Li Sh, Li M, Yuan Ch, Wang J, Xu Sh. Influence of atmospheric particulate matter on ozone in Nanjing, China: Observational study and mechanistic analysis. *Advances in Atmospheric Sciences.* 2018;35(11):1381–1395.
13. Weidinger T, Baranka G, Makra L, Gyöngyösi AZ. Chapter 5. Urban Air Quality and Road Traffic Air Pollution Modelling of Szeged. Urban Transport and Hybrid Vehicles. Rijeka, Croatia, Shanghai, China: Publisher Sciyo. 2010. p. 61–102.
14. Gvozdić V, Kovač-Andrić E, Brana J. Influence of Meteorological Factors NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO and PM<sub>10</sub> on the Concentration of O<sub>3</sub> in the Urban Atmosphere of Eastern Croatia. *Environmental Modeling and Assessment* 2011;16:491–501. DOI 10.1007/s10666-011-9256-4.
15. Vanderstraeten P, Forton M, Lenelle Y, Meurrens A, Carati D, Brenig L, Offer ZY, Zaady E. Elevated PM<sub>10</sub> concentrations and high PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> ratio in the Brussels Urban Area during the 2006 car-free Sunday. *International Journal of Environment and Waste Management.* 2010;6(3/4):264–279.
16. Unal YuS, Toros H, Deniz Al, Incecik S. Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM<sub>10</sub> concentrations in Istanbul metropolitan area. *Atmospheric Environment.* 2011;45:5504–5513.
17. Baltaci H, Kindap T, Unal A, Göktürk OM, Baltacibasi S, Pozzoli L, Incecik S, Karaca M. The Effects of Synoptic Circulation Types on PM<sub>10</sub> Concentrations in the Northwestern of Turkey. Air Quality Management at Urban, Regional and Global Scales. In: *4<sup>th</sup> International Symposium and IUAPPA Regional Conference 2012 September 10–13.* Istanbul –Turkey: [publisher unknown]; 2012. 9 p.
18. Russo A, Trigo RM, Martins H, Mendes MT. NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> and O<sub>3</sub> urban concentrations and its association with circulation weather types in Portugal. *Atmospheric Environment.* 2014; 89:768–785. Doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.02.010.
19. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. [Internet, cited 2023 June 25]. URL: <http://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
20. San-Miguel-Ayanz J, Durrant T, Boca R, Maianti P, Liberta` G, Vivancos AT, Oom, JFD, Branco A, De Rigo D, Ferrari D, Pfeiffer H, Grecchi R, Nuijten D, Onida M, Löffler P. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2020, EUR 30862 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2021.
21. Aerosol Robotic Network (AERONET) [Electronic resource, cited 2023 July 25]. URL: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>.
22. Лесные пожары в Чернобыльской зоне 2020. Материал из Википедии – свободной энциклопедии [Интернет, процитировано 13 мая 2023]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Лесные\\_пожары\\_в\\_Чернобыльской\\_зоне\\_\(2020\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Лесные_пожары_в_Чернобыльской_зоне_(2020)).
23. Состояние атмосферного воздуха во 2 квартале 2020 года. [Интернет, процитировано 13 мая 2023]. URL: <https://rad.org.by/articles/vozduh/sostoyanie-atmosfernogo-vozduha-vo-2-kvartale-2020-goda/> ©rad.org.by
24. Vlachogianni A, Kassomenos, Karppinen A, Karakitsios S, Kukkonen J. Evaluation of a multiple regression model for the forecasting of the concentrations of NO<sub>x</sub> and PM<sub>10</sub> in Athens and Helsinki. *Science of the Total Environment.* 201;409:1559–1571.
25. Акимов АН, Людчик АМ, Мельник ЕА, Павленко ПН. Сезонный ход концентраций антропогенных загрязнений воздуха и приземного озона в городах Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;3:16–30.
26. Ielpo P, Paolillo V, de Gennaro G, Dambruoso PR. PM<sub>10</sub> and gaseous pollutants trends from air quality monitoring networks in Bari province: principal component analysis and absolute principal component scores on a two years and half data set. *Chemistry Central Journal.* 2014; 8(14):2–12.

### References

1. Popescu F, Ionel I. Anthropogenic Air Pollution Sources. Chapter 1. In: Air Quality. Tezpur; India: Publisher Sciyo; 2020. 23 p.
2. Molina LT. Introductory lecture: air quality in megacities. *Faraday Discuss.* 2021;226:9–52.

3. Fuzzi S, Baltensperger U, Carslaw K, Decesari S, Denier van der Gon H, Facchini MC, Fowler D, Koren I, Langford B, Lohmann B, Nemitz E, Pandis S, Riiipinen I, Rudich Y, Schaap M, Slowik JG, Spracklen DV, Vignati E, Wild M, Williams M and Gilardoni S. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015; 15: 8217–8299.
4. EEA Report No 10/2019. Air quality in Europe — 2019 report 1994–2019. Luxembourg: European Environmental Agency; 2019.
5. *Prilozheniye 1 k postanovleniyu Ministerstva zdravookhraneniya Respubliki Belarus' 08.11.2016 № 113. Normativy predel'no dopustimyykh kontsentratsiy zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfernom vozdukh* [Appendix 1 to the resolution of the Ministry of Health of the Republic of Belarus 08.11.2016 No. 113. Standards for maximum permissible concentrations of pollutants in the atmospheric air]. [Internet, cited 2023 June 17]. Available from: [https://minzdrav.gov.by/upload/lcfiles/text\\_tnpa/000352\\_132617\\_postan113.pdf](https://minzdrav.gov.by/upload/lcfiles/text_tnpa/000352_132617_postan113.pdf). Russian.
6. Bozhkova VV, Bolot'ko LM, Lyudchik AM, Metel'skaya NS, Umreyko SD, Chaykovskiy AP. *Prichiny «strannogo» povedeniya prizemnogo ozona v aprele 2019 g* [Reasons for the «strange» behavior of ground-level ozone in April 2019. Natural resources]. *Prirodnyye resursy*. 2020;2:94–103. Russian.
7. Spindler G, Grüner A, Müller K, Schlimper S, Herrmann H. Long-term size-segregated particle (PM10, PM2.5, PM1) characterization study at Melpitz – influence of air mass inflow, weather conditions and season. *Journal of Atmospheric Chemistry*. 2013;70:165–195.
8. *Ezhegodnik sostoyaniya atmosfernogo vozdukh* [Yearbook of atmospheric air conditions]. [Internet, cited 2023 June 14]. Available from: <https://rad.org.by/articles/vozduh/>. Russian.
9. Bozhkova VV, Burak RN, Kozzeruk BB, Lyudchik AM, Mel'nik EA. *Antropogennoye zagryazneniye vozdukh* i prizemnyy ozon v gorodakh Belarusi [Anthropogenic air pollution and ground-level ozone in the cities of Belarus]. *Prirodnyye resursy*. 2018;1:92–101. Russian.
10. Bozhkova VV, Lyudchik AM, Umreika AD. Influence of meteorological conditions on urban air pollution. *Acta Geographica Silesiana*. 2020;14(4):5–21.
11. Gallero FGG, Vallejo MG, Umbria A, Baena JB. Multivariate statistical analysis of meteorological and air pollution data in the 'Campo de Gibraltar' region, Spain. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2006; 119:405–423. DOI: 10.1007/s10661-005-9033-4.
12. Qu Y, Wang T, Cai Y, Wang Sh, Pulong Chen P, Li Sh, Li M, Yuan Ch, Wang J, Xu Sh. Influence of atmospheric particulate matter on ozone in Nanjing, China: Observational study and mechanistic analysis. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2018;35(11):1381–1395.
13. Weidinger T, Baranka G, Makra L, Gyöngyösi AZ. Chapter 5. Urban Air Quality and Road Traffic Air Pollution Modelling of Szeged. Urban Transport and Hybrid Vehicles. Rijeka, Croatia, Shanghai, China: Publisher Sciyo. 2010. p. 61–102.
14. Gvozdić V, Kovač-Andrić E, Brana J. Influence of Meteorological Factors NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO and PM10 on the Concentration of O<sub>3</sub> in the Urban Atmosphere of Eastern Croatia. *Environmental Modeling and Assessment* 2011;16:491–501. DOI 10.1007/s10666-011-9256-4.
15. Vanderstraeten P, Forton M, Lenelle Y, Meurrens A, Carati D, Brenig L, Offer ZY, Zaady E. Elevated PM10 concentrations and high PM2.5/PM10 ratio in the Brussels Urban Area during the 2006 car-free Sunday. *International Journal of Environment and Waste Management*. 2010;6(3/4):264–279.
16. Unal YuS, Toros H, Deniz Al, Incecik S. Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM10 concentrations in Istanbul metropolitan area. *Atmospheric Environment*. 2011;45:5504–5513.
17. Baltaci H, Kindap T, Unall A, Göktürk OM, Baltacıbasi S, Pozzoli L, Incecik S, Karaca M. The Effects of Synoptic Circulation Types on PM10 Concentrations in the Northwestern of Turkey. Air Quality Management at Urban, Regional and Global Scales. In: *4<sup>th</sup> International Symposium and IUAPPA Regional Conference 2012 September 10–13*. Istanbul –Turkey: [publisher unknown]; 2012. 9 p.
18. Russo A, Trigo RM, Martins H, Mendes MT. NO<sub>2</sub>, PM10 and O<sub>3</sub> urban concentrations and its association with circulation weather types in Portugal. *Atmospheric Environment*. 2014; 89:768–785. Doi:org/10.1016/j.atmosenv.2014.02.010.
19. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. [Internet, cited 2023 June 25]. Available from: <http://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
20. San-Miguel-Ayanz J, Durrant T, Boca R, Maianti P, Liberta' G, Vivancos AT, Oom, JFD, Branco A, De Rigo D, Ferrari D, Pfeiffer H, Grecchi R, Nuijten D, Onida M, Löffler P. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2020, EUR 30862 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2021.
21. Aerosol Robotic Network (AERONET) [Electronic resource, cited 2023 July 25]. Available from: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>.
22. *Lesnyye pozhary v Chernobyl'skoy zone 2020. Material iz Vikipedii – svobodnoy entsiklopedii* [Forest fires in the Chernobyl zone 2020. Material from Wikipedia - the free encyclopedia]. [Internet, cited 2023 May 13]. Available from: <https://ru.wikipedia.org/wiki>.
23. *Sostoyaniye atmosfernogo vozdukh vo 2 kvartale 2020 goda* [State of atmospheric air in the 2nd quarter of 2020]. [Internet, cited 2023 May 13]. Available from: <https://rad.org.by/articles/vozduh/sostoyanie-atmosfernogo-vozduha-vo-2-kvartale-2020-goda/> ©rad.org.by.
24. Vlachogianni A, Kassomenos, Karppinen A, Karakitsios S, Kukkonen J. Evaluation of a multiple regression model for the forecasting of the concentrations of NOx and PM10 in Athens and Helsinki. *Science of the Total Environment*. 201;409:1559–1571.
25. Akimov AN, Lyudchik AM, Mel'nik YEA, Pavlenko PN. *Sezonnyy khod kontsentratsiy antropogennykh zagryazneniy vozdukh* i prizemnogo ozona v gorodakh Belarusi [Seasonal course of concentrations of anthropogenic air pollution and ground-level ozone in the cities of Belarus]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya*. 2023;3:16–30. Russian.
26. Ielpo P, Paolillo V, de Gennaro G, Dambruoso PR. PM10 and gaseous pollutants trends from air quality monitoring networks in Bari province: principal component analysis and absolute principal component scores on a two years and half data set. *Chemistry Central Journal*. 2014; 8(14):2–12.

Статья поступила в редколлегию 31.10.2023.  
Received by editorial board 31.10.2023.

УДК 628.179.2

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА МЯСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

А. П. СЕКИРИНА<sup>1</sup>, В. М. МИСЮЧЕНКО<sup>1</sup>

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

В исследовании представлен анализ водного баланса мясоперерабатывающих предприятий Республики Беларусь по отдельным стадиям технологического процесса на основании имеющегося опыта разработки индивидуальных технологических нормативов водопользования. Предприятия отбирались на основании объемов перерабатываемого сырья свыше 50000 т мяса птицы и 20000 т мяса КРС и свиней, находящиеся в разных регионах страны. Определено, что норматив водопотребления на технологически нужды при переработке мяса птицы выше, чем при производстве продукции из мяса сельскохозяйственных животных, при этом безвозвратное водопотребление предприятий первой группы достигает 80 %, а при переработке мяса крупного рогатого скота и свиней до 30 % от общего объема водопотребления. Установлено, что на всех стадиях технологического процесса в соответствии с санитарными нормами, предъявляемыми к предприятиям по переработке мяса различных направлений, используется вода питьевого качества. Пройдя любую из стадий технологического процесса, вода сбрасывается в сети канализации предприятия и далее сточные воды поступают на очистные сооружения предприятия или населенного пункта. На разных стадиях процесса вода имеет различный компонентный состав и концентрации загрязнений. Так, на стадиях убоя и обработки мяса она загрязняется различными химическими веществами, загрязнениями биологического происхождения (кровь, жиры) и патогенными микроорганизмами. Для системы оборотного водоснабжения предложено возвращать воду со стадии охлаждения готовой продукции, не имеющую контакта с продуктом (порядка 45 % от общего водопотребления на охлаждение продукции). Расчет внедрения оборотной системы водоснабжения для предприятия по производству продукции из мяса крупного рогатого скота свидетельствует, что на 16 % уменьшится водопотребление и на 22,3 % снизится объем сточных вод. При этом при переработке мяса птицы эти показатели значительно ниже – 0,7 % экономии воды питьевого качества и уменьшение объемов сточных вод на 1,52 %.

**Ключевые слова:** баланс водопотребления и водоотведения; нормативные требования; безвозвратные потери воды; оборотное водоснабжение; индивидуальные технологические нормативы водопользования.

---

### Образец цитирования:

Секирина АП, Мисюченко ВМ. Анализ возможности внедрения систем оборотного водоснабжения на мясоперерабатывающих предприятиях. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;1:82–92.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-82-92>

### For citation:

Sekirina AP, Misiuchenka VM. Analysis of the possibility of implementing recycling water supply systems in meat processing enterprises. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;4:82–92. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-82-92>

---

### Авторы:

**Александра Павловна Секирина** – магистрант кафедры экологического мониторинга и менеджмента.  
**Виктория Мечеславовна Мисюченко** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; доцент кафедры экологического мониторинга и менеджмента.

### Authors:

**Alexandra P. Sekirina**, master's degree student at the department of the environmental monitoring and management.  
[s.sekirina@gmail.com](mailto:s.sekirina@gmail.com)  
**Viktoryia M. Misiuchenka**, PhD (agriculture), docent; associate professor at the department of the environmental monitoring and management.  
[vi925@mail.ru](mailto:vi925@mail.ru)

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF IMPLEMENTING RECYCLING WATER SUPPLY SYSTEMS IN MEAT PROCESSING ENTERPRISES

A. P. SEKIRINA<sup>a</sup>, V. M. MISIUCHENKA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,  
23/1 Daihabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus  
Corresponding author: A. P. Sekirina (s.sekirina@gmail.com)

The article presents an analysis of the water balance of meat processing enterprises of the Republic of Belarus at individual stages of the technological process based on the existing experience in developing individual technological standards for water use. Enterprises were selected based on the volume of processed raw materials, over 50,000 tons of poultry meat and 20,000 tons of cattle and pig meat, located in different regions of the Republic of Belarus. It has been determined that the water consumption standard for technological needs in the processing of poultry meat is higher than in the production of products from the meat of farm animals, while the irretrievable water consumption of enterprises of the first group reaches 80 %, and in the processing of cattle and pig meat up to 30 % of the total water consumption. It has been established that at all stages of the technological process, in accordance with the sanitary standards for meat processing enterprises of various types, drinking water is used. Having passed any of the stages of the technological process, the water is discharged into the enterprise's sewerage network and then the wastewater enters the treatment facilities of the enterprise or populated area. At different stages of the process, water has different component composition and concentrations of contaminants, for example, at the stages of slaughter and meat processing, it is contaminated with various chemicals, contaminants of biological origin (blood and fats) and pathogenic microorganisms. For the recycling water supply system, it is proposed to return water from the stage of cooling the finished product that does not have contact with the product (about 45 % of the total water consumption for cooling the product). Calculation of the implementation of a recycling water supply system for an enterprise producing cattle meat products showed that water consumption will decrease by 16 % and the volume of wastewater will decrease by 22.3 %. At the same time, when processing poultry meat, these figures are significantly lower – 0.7 % savings in drinking water quality and a reduction in wastewater volumes by 1.52 %.

**Keywords:** balance of water consumption and water disposal; regulatory requirements; irretrievable water losses; recycling water supply; individual technological standards for water use.

### Введение

В соответствии со ст. 3 Водного Кодекса Республики Беларусь охрана и использование вод осуществляется на основе следующих принципов:

- рационального (устойчивого) использования водных ресурсов;
- приоритета использования подземных вод для питьевых нужд перед иным их использованием;
- комплексного использования водных ресурсов;
- предупреждения загрязнения, засорения вод;
- платности водопользования;
- возмещения вреда, причиненного водным объектам и т. д.<sup>1</sup>

В настоящий момент предприятиями мясоперерабатывающей отрасли Республики Беларусь на технологические нужды (в соответствии с санитарными требованиями) используется вода питьевого качества. При проведении работ по расчету индивидуальных технологических нормативов водопользования, выполненных в соответствии с действующими нормативными правовыми актами Республики Беларусь, для нескольких предприятий мясоперерабатывающего комплекса выявлено, что, пройдя любую из стадий технологического процесса, вода отводится в сети канализации и используется нерационально. Поэтому весьма актуальна проработка вопроса о возможности использования оборотного или повторного водоснабжения на предприятиях этого комплекса.

В технологическом процессе мясоперерабатывающих предприятий вода расходуется на мойку производственных помещений, оборудования, тары и инвентаря, мойку и обработку туш, приготовление рецептурных смесей, приготовление продукции (варка, копчение), охлаждение продукции, размораживание и замораживание сырья и продукции, предубойное содержание сельскохозяйственных животных, выращивание птицы, приготовление дезинфицирующих растворов, вспомогательные производственные нужды (нужды лаборатории, котельной и т. п.).

<sup>1</sup>Водный Кодекс Республики Беларусь: Кодекс Республики Беларусь от 30.04.2014 № 149-3 (с изменениями от 22.07.2023) // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. 2014. № 2/2147.

## Материалы и методы исследования

Объектом исследования стали водные балансы мясоперерабатывающих предприятий Республики Беларусь, на основании которых были выявлены стадии технологического процесса, для которых возможно использование оборотного водоснабжения в будущем при разработке проектов строительства новых предприятий или модернизации существующих производств. Предприятия отбирались на основании объемов перерабатываемого сырья свыше 50 000 т мяса птицы и 20 000 т мяса КРС и свиней, находящиеся в разных регионах Республики Беларусь.

Исследования проводились на основании выполненных работ по расчету индивидуальных технологических нормативов водопользования в соответствии с ТКП 17.02-13/1-2015 «Правила расчета технологических нормативов. Часть 1. Основные положения. Правила расчета технологических нормативов водопотребления и водоотведения», а с 01.03.2023 – ЭкоНиП 17.06.04-004-2022 «Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Правила расчета технологических нормативов водопользования» и постановления Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 4 мая 2015 г. № 21 «О некоторых вопросах разработки технологических нормативов водопользования» для нескольких предприятий мясоперерабатывающего комплекса».

## Результаты исследования и их обсуждение

На основании выполненных расчетов индивидуальных технологических нормативов водопользования для мясоперерабатывающих предприятий можно сделать вывод, что объемы, расходуемые на технологические нужды, отличаются для производства продукции из мяса птицы и мяса сельскохозяйственных животных. Усредненные данные по предприятиям обоих направлений представлены на рис. 1 и 2.

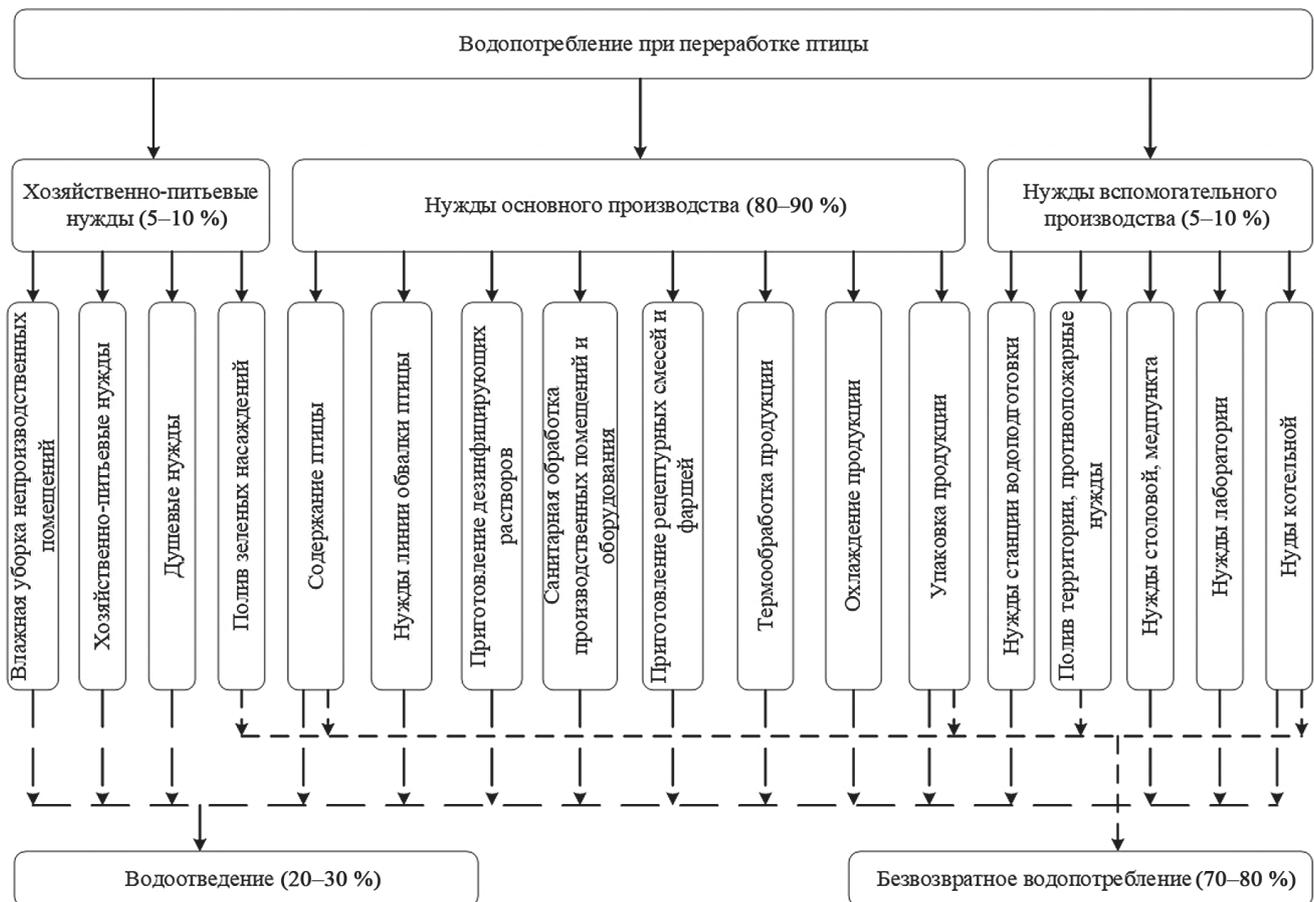


Рис. 1. Баланс водопотребления и водоотведения предприятия по переработке мяса птицы

Fig. 1. Balance of water consumption and sanitation of poultry meat processing enterprises

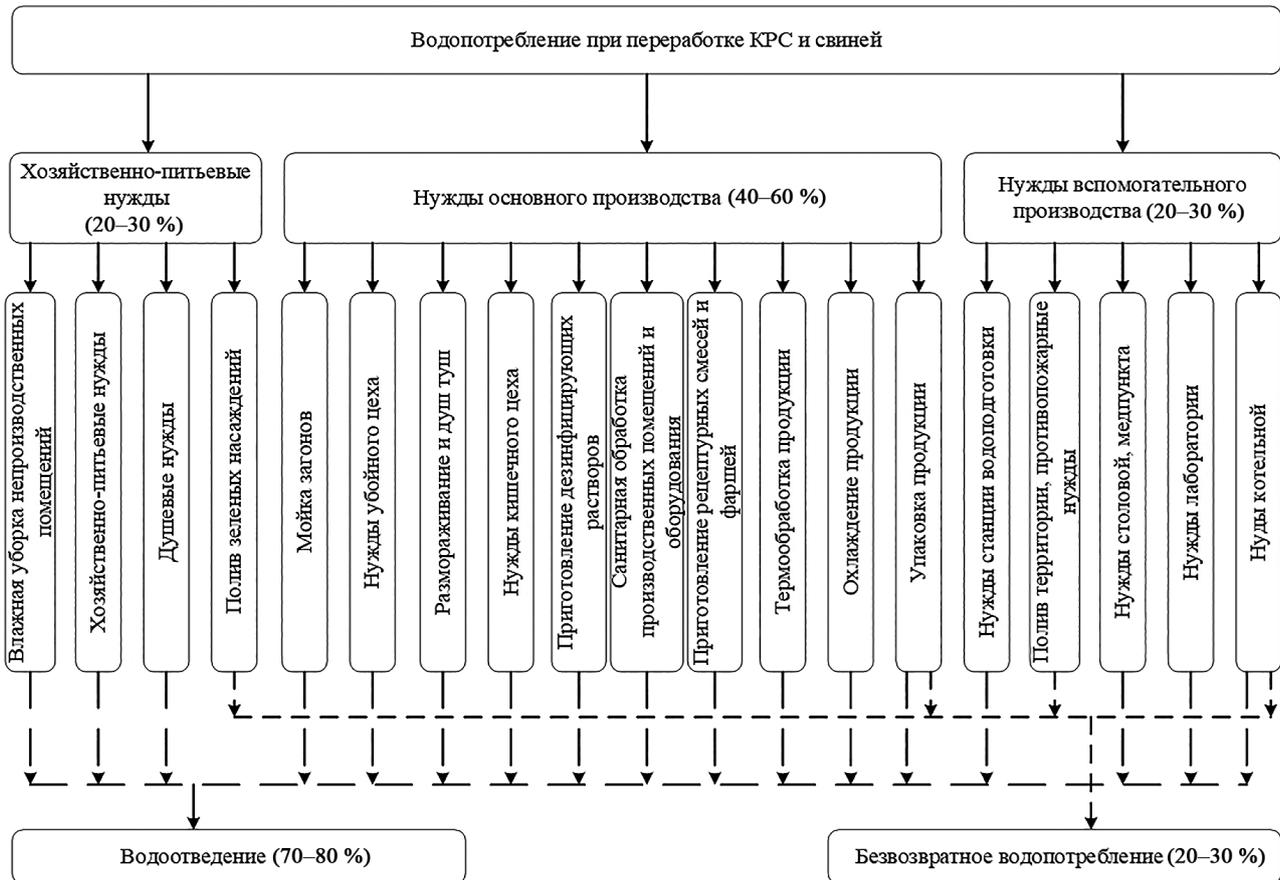


Рис. 2. Баланс водопотребления и водоотведения предприятия по переработке мяса крупного рогатого скота и свиней

Fig. 2. Balance of water consumption and sanitation of cattle and pig meat processing enterprises

На представленных схемах видно, что из общего объема водопотребления предприятия доля воды, расходуемой на технологические нужды при переработке мяса птицы, практически в 2 раза выше, чем при производстве продукции из мяса крупного рогатого скота (далее – КРС) и свиней. При этом доля безвозвратных потерь при производстве продукции из мяса птицы выше более чем в 2 раза. Это обусловлено тем, что большая часть воды расходуется на выращивание и содержание птицы. При производственной мощности птичников 2 045 000 голов (среднее значение по выполненным расчетам для крупных предприятий данного направления) водопотребление на содержание птицы составит:

$$W = \frac{n * N * T}{1000000} = \frac{1 * 2045000 * 365}{1000000} = 677,075 \text{ тыс. м}^3/\text{год},$$

где  $n$  – проектная норма водопотребления для кур, 1 л/сут. на одну птицу (согласно табл. А.3 СН 4.01.01-2019 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения»)<sup>2</sup>;

$N$  – поголовье птицы, головы;

$T$  – количество рабочего времени птичников, в сутках за календарный год;

1 000 000 – переводной коэффициент.

В отличие от переработки птицы, при производстве продукции из мяса КРС и свиней сельскохозяйственные животные содержатся в загонах не более 18 ч, либо сырье приходит замороженным. При предубойном содержании сельскохозяйственных животных водопотребление составит (при среднем поголовье 400 голов КРС и 1 200 голов свиней):

$$W = \frac{n * N * T}{1000000} = \frac{30 * 400 * 365 + 15 * 200 * 365}{1000000} = 10,95 \text{ тыс. м}^3/\text{год},$$

где  $n$  – проектная норма водопотребления для КРС 30 л/сут. на одну голову и для свиней 15 л/сут. на одну голову (согласно табл. А.3 СН 4.01.01-2019 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения»);

$N$  – поголовье сельскохозяйственных животных, головы;

$T$  – количество рабочего времени птичников, в сутках за календарный год;

1 000 000 – переводной коэффициент.

<sup>2</sup>СН 4.01.01-2019. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Введ. РБ 31.10.2-19. Минск: Стройтехнорм, 2020. 69 с.

Безвозвратное водопотребление в обоих случаях составляет 85 %.

Дальнейшая переработка включает в себя стадии убоя, обескровливания и разделки (обвалки) туш в случае переработки КРС и свиней; при переработке птицы на первом этапе переработки можно выделить стадии убоя, ошпаривания, удаления пера, потрошение и обвалку. Расход воды на эти процессы зависит от линии, установленной на предприятии, используется ли при производстве работ ручной труд и очень разнится на предприятиях одного направления.

Водопотребление на эти стадии зависит от времени работы оборудования и расхода воды, необходимого для работы этого оборудования. При использовании ручного труда в расчете учитывается расход воды на точке подачи воды и время ее работы.

Расход воды можно выразить формулой:

$$W = \frac{n * N * T}{1000}, \text{ тыс. м}^3/\text{год},$$

где  $n$  – норма расхода воды единицей оборудования, м<sup>3</sup>/час, расход воды на точке подачи воды, м<sup>3</sup>/час;

$N$  – количество единиц данного оборудования, шт., точек подачи воды, шт.;

$T$  – время работы оборудования, точек подачи воды, в часах за календарный год;

1000 – переводной коэффициент.

На следующей стадии – изготовлении мясной продукции – вода расходуется на приготовление рецептурных смесей фаршей. Вода может добавляться в смесь в чистом виде или в виде дробленого льда. Водопотребление на эту стадию можно рассчитать по формуле:

$$W = \frac{n * N}{1000}, \text{ тыс. м}^3/\text{год},$$

где  $n$  – норма расхода воды согласно рецептуре на  $t$  готовой продукции, м<sup>3</sup>/т;

$N$  – количество выпускаемой продукции в год, т;

1000 – переводной коэффициент.

Анализируя формулу можно сделать вывод, что расход воды на приготовление рецептурных смесей так же будет отличаться и зависеть от ассортимента и объема выпускаемой продукции.

Термообработка продукции происходит в камерах копчения, в которых предусмотрены режимы варки, копчения и смешанный режим. При режиме варки и смешанном режиме в «рубашку» аппарата подается пар, который при расчете учитывается как вода, расход пара в аппарате регулируется автоматически в зависимости от используемой программы. Соответственно водопотребление на термообработку продукции можно определить по формуле:

$$W = \frac{n_1 * T_1 + n_2 * T_2}{1000}, \text{ тыс. м}^3/\text{год},$$

где  $n_1, n_2$  – норма расхода воды единицей оборудования на заданную программу, м<sup>3</sup>/час;

$T_1, T_2$  – время работы оборудования по данной программе, в часах за календарный год;

1000 – переводной коэффициент.

Охлаждение готовой продукции происходит в камерах охлаждения, где предусмотрены режимы охлаждения водным душем, охлаждение воздухом и смешанный. При режиме охлаждения воздухом и смешанном режиме в «рубашку» аппарата подается вода, которая охлаждает воздух в аппарате, расход воды регулируется автоматически для поддержания нужной температуры. Водопотребление на охлаждение продукции можно определить по формуле:

$$W = \frac{n_1 * T_1 + n_2 * T_2}{1000}, \text{ тыс. м}^3/\text{год},$$

где  $n_1, n_2$  – норма расхода воды в «рубашке» камеры и расход воды в форсунках для охлаждения водным душем, м<sup>3</sup>/час;

$T_1, T_2$  – время работы оборудования в режиме холодного воздуха и водяного душа, в часах за календарный год;

1000 – переводной коэффициент.

Водопотребление на упаковку продукции расходуется на термоусадку пленки и зависит от модели оборудования. Расход воды на аппарат определяется на основании его объема, учитывая процент потерь воды, которая выносится с упаковкой. Обычно вода в оборудовании меняется каждую смену. Водопотребление можно рассчитать по формуле:

$$W = \frac{V * N * n * T + 0,05 * V * N * \tau * n * T}{1000}, \text{ тыс. м}^3/\text{год},$$

где  $V$  – объем воды в аппарате, м<sup>3</sup>;

$N$  – количество единиц оборудования, шт.;

$n$  – количество смен работы в сутки, смен;  
 $T$  – количество рабочего времени в сутках за календарный год;  
 $0,05$  – коэффициент, учитывающий потери воды из аппарата;  
 $\tau$  – время работы оборудования в смену, час/смену;  
 $1000$  – переводной коэффициент.

Расчеты водопотребления на мойку производственных помещений, вспомогательные нужды производства, хозяйственно-питьевые нужды представлены в ЭкоНиП 17.06.04-004-2022 «Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Правила расчета технологических нормативов водопользования»<sup>3</sup>.

На основании выполненных расчетов для предприятия по переработке мяса индивидуальный технологический норматив водопотребления составляет:

$$N_1^B = \frac{W_{\text{пр1}}}{P},$$

где  $W$  – расход воды на производство продукции, м<sup>3</sup>/год;  
 $P$  – объем переработанного мяса птицы, т/год –

$$N_1^B = \frac{1142781}{76376,3} = 14,96 \text{ м}^3/\text{т мяса птицы.}$$

Индивидуальный технологический норматив водоотведения составит:

$$N_1^C = \frac{S_{\text{пр1}}}{P} = \frac{478082}{76376,3} = 6,26 \text{ м}^3/\text{т мяса птицы.}$$

Для предприятия по переработке мяса КРС и свиней индивидуальный технологический норматив водопотребления:

$$N_1^B = \frac{163700}{20408,65} = 8,02 \text{ м}^3/\text{т мяса.}$$

Индивидуальный технологический норматив водоотведения составит:

$$N_1^C = \frac{S_{\text{пр1}}}{P} = \frac{137704}{20408,65} = 6,75 \text{ м}^3/\text{т мяса.}$$

В качестве примера результатов расчетов водного баланса предприятий в зависимости от направления переработки мяса, можно привести данные (табл. 1 и 2).

Таблица 1

**Баланс водопотребления и водоотведения предприятия  
по переработке мяса птицы производственной мощностью 76376,3 т мяса в год**

Table 1

**Balance of water consumption and sanitation of poultry meat processing enterprises**

Назначение водопотребления	Объем водопотребления		Объем водоотведения, м <sup>3</sup>		Безвозвратные потери, м <sup>3</sup>	
	в сутки, м <sup>3</sup>	в год, тыс. м <sup>3</sup>	в сутки, м <sup>3</sup>	в год, тыс. м <sup>3</sup>	в сутки, м <sup>3</sup>	в год, тыс. м <sup>3</sup>
Хозяйственно-питьевые нужды						
Хозяйственно-питьевые нужды	41,800	15,257	41,800	15,257		
Душевые нужды	195,000	71,175	195,000	71,175		
Полив территории	134,575	49,120			134,575	49,120
Нужды медпункта	0,162	0,059	0,162	0,059		
Нужды бассейна	6,247	2,280	1,973	0,720	4,274	1,560
<b>Итого</b>	<b>377,784</b>	<b>137,891</b>	<b>238,935</b>	<b>87,211</b>	<b>138,849</b>	<b>50,680</b>

<sup>3</sup>Об утверждении экологических норм и правил: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 30.11.2022 № 26-Г (с изменениями от 15.02.2024). Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. 2023. № 8/39331.

Окончание табл. 1

Ending Table 1

Назначение водопотребления	Объем водопотребления		Объем водоотведения, м <sup>3</sup>		Безвозвратные потери, м <sup>3</sup>	
	в сутки, м <sup>3</sup>	в год, тыс. м <sup>3</sup>	в сутки, м <sup>3</sup>	в год, тыс. м <sup>3</sup>	в сутки, м <sup>3</sup>	в год, тыс. м <sup>3</sup>
Технологические нужды						
Производственные нужды						
Содержание птицы	1855	677,075	40,301	14,71	1814,699	662,365
Приготовление рецептурных смесей	6,112	2,231			6,112	2,231
Охлаждение продукции	66,392	24,233	66,392	24,233		
Участок приготовления моющих средств и дезрастворов	0,584	0,213	0,301	0,11	0,282	0,103
Мойка оборудования, помещений и инвентаря	112,003	40,881	112,003	40,881		
Цех убоа	1090,816	398,148	1090,816	398,148		
<b>Итого</b>	<b>3130,907</b>	<b>1142,781</b>	<b>1309,813</b>	<b>478,082</b>	<b>1821,093</b>	<b>664,699</b>
Вспомогательные нужды						
Нужды лаборатории	16,934	6,181	16,934	6,181		
Нужды котельной	46,959	17,14	32,408	11,829	14,551	5,311
Заправка дезбарьеров	31,485	11,492			31,485	11,492
Нужды столовой	8,548	3,120	8,548	3,120		
Нужды прачечной	350,734	128,018	350,734	128,018		
<b>Итого</b>	<b>454,66</b>	<b>165,951</b>	<b>408,624</b>	<b>149,148</b>	<b>46,036</b>	<b>16,803</b>
<b>Всего</b>	<b>3963,351</b>	<b>1446,623</b>	<b>1957,372</b>	<b>714,441</b>	<b>2005,978</b>	<b>732,182</b>

Таблица 2

**Баланс водопотребления и водоотведения предприятия по переработке мяса КРС и свиней производственной мощностью 20408,65 т мяса в год**

Table 2

**Balance of water consumption and sanitation of cattle and pig meat processing enterprises**

Назначение водопотребления	Объем водопотребления		Объем водоотведения, м <sup>3</sup>		Безвозвратные потери, м <sup>3</sup>	
	в сутки, м <sup>3</sup>	в год, тыс. м <sup>3</sup>	в сутки, м <sup>3</sup>	в год, тыс. м <sup>3</sup>	в сутки, м <sup>3</sup>	в год, тыс. м <sup>3</sup>
Хозяйственно-питьевые нужды						
Хозяйственно-питьевые нужды	8,444	3,082	8,444	3,082		
Душевые нужды	54,000	19,710	54,000	19,710		
Полив территории	52,162	19,039			52,162	19,039
Нужды медпункта	0,093	0,034	0,093	0,034		
<b>Итого</b>	<b>114,699</b>	<b>41,865</b>	<b>62,537</b>	<b>22,826</b>	<b>52,162</b>	<b>19,039</b>

Назначение водопотребления	Объем водопотребления		Объем водоотведения, м <sup>3</sup>		Безвозвратные потери, м <sup>3</sup>	
	в сутки, м <sup>3</sup>	в год, тыс. м <sup>3</sup>	в сутки, м <sup>3</sup>	в год, тыс. м <sup>3</sup>	в сутки, м <sup>3</sup>	в год, тыс. м <sup>3</sup>
Технологические нужды						
Производственные нужды						
Предубойное содержание животных	30	10,950			30	10,95
Приготовление рецептурных смесей	41,222	15,046			41,222	15,046
Охлаждение продукции	318,301	116,18	318,301	116,18		
Подготовка натуральной оболочки	1,203	0,439	1,203	0,439		
Термоусадка пленки при упаковке продукции	0,419	0,153	0,419	0,153		
Санитарная обработка технологического оборудования и производственных помещений	56,701	20,696	56,701	20,696		
Приготовление дезинфицирующих растворов	0,647	0,236	0,647	0,236		
<b>Итого</b>	<b>448,493</b>	<b>163,700</b>	<b>377,271</b>	<b>137,704</b>	<b>71,222</b>	<b>25,996</b>
Вспомогательные нужды						
Нужды лаборатории	25,753	9,4	25,753	9,4		
Нужды котельной	178,896	65,297	29,077	10,613	149,819	54,684
Нужды котельной (конденсат)*			1,679	0,613		
Нужды столовой	4,688	1,711	4,688	1,711		
Нужды прачечной	4,000	1,460	4,000	1,460		
Противопожарные нужды	0,005	0,002			0,005	0,002
Нужды станции обезжелезивания	70,411	25,7	70,411	25,7		
Нужды очистных сооружений	65,693	23,978	65,693	23,978		
<b>Итого</b>	<b>349,446</b>	<b>127,548</b>	<b>201,301</b>	<b>73,475</b>	<b>149,824</b>	<b>54,686</b>
<b>Всего</b>	<b>912,638</b>	<b>333,113</b>	<b>639,430</b>	<b>233,392</b>	<b>273,208</b>	<b>99,721</b>

На всех стадиях технологического процесса используется вода питьевого качества. На стадиях убой и обработки мяса вода загрязняется кровью и жиром. После мойки и дезинфекции оборудования к вышеупомянутым загрязнениям добавляются растворы кислот и щелочей, а также поверхностно активные вещества. В процессе первичной обработки мяса в воду попадают и патогенные микроорганизмы. В настоящее время проведены исследования содержания патогенных микроорганизмов в сточных водах предприятий рассматриваемого направления, разработаны биотесты для определения токсичности этой микрофлоры [1; 2].

В табл. 3 представлены сведения о концентрациях химических и иных веществ в составе сточных вод предприятий по переработке мяса, попадающих на очистные сооружения от всех стадий технологического процесса и хозяйственно-питьевых нужд работающих, а также требования к показателям на выпуске в поверхностный водный объект и в сети канализации населенного пункта.

Очистка сточных вод, содержащих такие концентрации загрязнений, до показателей качества питьевой воды предполагает наличие многостадийной системы очистки воды, включающей стадии механической и биологической очистки, а также применение обеззараживания воды. В настоящий момент на предприятии по переработке мяса птицы эксплуатируются очистные сооружения, обеспечивающие очистку сточных вод до нормируемых показателей на выпуске в поверхностный водный объект. Предприятию, выпускающему продукцию из мяса КРС и свиней, сбрасывает сточные воды на поля фильтрации.

Организация системы повторного или оборотного водоснабжения целесообразна, когда затраты на очистку воды, возвращаемой в процесс, ниже суммарных затрат на водоподготовку и очистку сточной воды до нормативных показателей, позволяющих сбрасывать ее в водные объекты или системы канализации населенного пункта.

Сведения о концентрациях загрязнений на каждой стадии технологического процесса отсутствуют – перед предприятиями не стоит такой задачи. Целесообразно в систему оборотного или повторного водоснабжения возвращать воду, прошедшую технологический процесс, которая не имела контакта с продуктом. Например, от охлаждения готовой продукции (вода, которая проходит по «рубашке» аппарата для охлаждения воздуха в камере). Такая вода не меняет своего качественного состава и может быть использована на этой же стадии. При проведении расчетов водопотребления предприятий выяснилось, что расход воды, не имеющей контакта с продуктом, составляет 45 % от общего водопотребления на охлаждение продукции.

Таблица 3

**Концентрации химических и иных веществ в составе сточных вод мясоперерабатывающих предприятий, требования к качеству сточных вод на выпуске в поверхностный водный объект и сети канализации населенного пункта, а также к качеству питьевой воды**

Table 3

**Concentrations of chemicals and other substances in wastewater from meat processing plants, requirements for the quality of wastewater at the outlet to the surface water body and sewerage network of the settlement, as well as for the quality of drinking water**

Наименование показателя	Размерность	Значения на входе на очистные сооружения	Требования на выпуске в поверхностный водный объект <sup>4</sup>	Требования на выпуске в канализацию населенного пункта <sup>5</sup>	Требования к качеству питьевой воды <sup>6</sup>	
рН	ед. рН	7	6,5–8,5	6,5–8,5	6–9	
Взвешенные вещества	мг/м <sup>3</sup>	600	35	Согласно утвержденной в установленном порядке проектной документации, техническим регламентам эксплуатации очистных сооружений	н/у	
БПК <sub>5</sub>	мгО <sub>2</sub> /м <sup>3</sup>	830	25		н/у	
Хлорид-ион	мг/м <sup>3</sup>	164	300		350	
Сульфат-ион	мг/м <sup>3</sup>	60	100		500	
Минерализация	мг/м <sup>3</sup>	900	1000		1000	
ХПК <sub>Cr</sub>	мгО <sub>2</sub> /м <sup>3</sup>	3700	120		5	
СПАВ	мг/м <sup>3</sup>	0,5	0,1		0,5	
Азот общий	мг/м <sup>3</sup>	60	25		н/у	
Фосфор общий	мг/м <sup>3</sup>	30	3		10	н/у
Нефтепродукты	мг/м <sup>3</sup>	1,2	0,05		1,2	0,1
Аммоний ион	мгN/м <sup>3</sup>	42	10	35	н/у	

<sup>4</sup>О нормативах допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 26.05. 2017 № 16. Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. 2017. № 8/32141.

<sup>5</sup>Об утверждении Правил пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 30.09.2016 № 788 (с изменениями от 19.11.2020). Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. 2016. № 5/42720.

<sup>6</sup>СанПиН 10-124 РБ 99. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества Санитарные правила и нормы: введ. 19.10.1999 (с изменениями от 14.12.2007) [Электронный ресурс]. URL: <https://bii.by/tx.dll?d=244663&f=%F1%E0%ED%EF%E8%ED+124#f> (дата обращения: 29.02.2024).

Таким образом, для предприятий по переработке птицы (табл. 1) экономия воды составит

$$\mathcal{E}_д = \frac{0,45 * W_{охл}}{W_{общ}} * 100 = \frac{0,45 * 24,233}{1446,623} * 100 = 0,7 \%$$

При этом объем сточных вод уменьшится на

$$\mathcal{E}_{св} = \frac{0,45 * W_{охл}}{W_{общ св}} * 100 = \frac{0,45 * 24,233}{714,441} * 100 = 1,52 \%$$

Для предприятий по переработке мяса КРС и свиней:

$$\mathcal{E}_д = \frac{0,45 * W_{охл}}{W_{общ}} * 100 = \frac{0,45 * 116,18}{322,163} * 100 = 16,2 \%$$

$$\mathcal{E}_{св} = \frac{0,45 * W_{охл}}{W_{общ св}} * 100 = \frac{0,45 * 116,18}{234,005} * 100 = 22,3 \%$$

где  $\mathcal{E}_д$  – экономия при добыче воды, %;

$\mathcal{E}_{св}$  – экономия при сбросе сточных вод, %;

$W_{охл}$  – расход воды на охлаждение продукции, м<sup>3</sup>/год;

$W_{общ}$  – общее водопотребление предприятия, м<sup>3</sup>/год;

$W_{общ св}$  – общее водоотведение предприятия, м<sup>3</sup>/год.

На основании полученных расчетов можно сделать вывод, что на взятом для примера предприятии по переработке мяса КРС и свиней имеет смысл внедрение оборотной системы водоснабжения для охлаждающей воды, так как на 16 % уменьшится водопотребление и на 22,3 % – объем сточных вод. Это подтверждается исследованиями различных авторов [3; 4].

По мнению авторов [5], оборотные или последовательные системы водного хозяйства следует вводить на вновь строящихся, действующих и подлежащих реконструкции предприятиях, поскольку внедрение системы требует остановки производства и капитальных затрат.

### Заключение

На основании нормативных документов Республики Беларусь и опыта работы на предприятиях мясоперерабатывающей промышленности выполнен анализ их водного баланса.

1. Установлено, что безвозвратное водопотребление на предприятиях по производству мяса птицы достигает 80 %, в то время как на предприятиях по производству мяса крупного рогатого скота и свиней 40–60 %.

2. Определено, что из общего объема водопотребления предприятия доля воды, расходуемой на технологические нужды при переработке мяса птицы, практически в 2 раза выше, чем при производстве продукции из мяса крупного рогатого скота и свиней. При этом и доля безвозвратных потерь при производстве продукции из мяса птицы выше более чем в 2 раза, что обусловлено большими расходами воды на выращивание и содержание птицы.

3. Все предприятия мясоперерабатывающей промышленности используют воду питьевого качества, которая на стадиях убой и обработки мяса загрязняется различными химическими веществами и патогенными микроорганизмами со значительными превышениями концентраций по сбросу в городские канализационные сети.

4. Для системы оборотного водоснабжения предложено возвращать воду (порядка 45 % от общего водопотребления на охлаждение продукции) после использования в техпроцессе до стадии контакта с готовым продуктом. Расчет внедрения оборотной системы водоснабжения для предприятия по производству мяса крупного рогатого скота показал, что на 16 % уменьшится водопотребление и на 22,3 % снизится объем сточных вод.

5. На основании анализа водного баланса предприятий по переработке мяса в Республике Беларусь выявлено, что внедрение систем оборотного или повторного водоснабжения возможно, но требует значительных финансовых вложений.

6. Оборотные или последовательные системы водного хозяйства следует вводить на вновь строящихся или действующих и подлежащих реконструкции предприятиях. В последнем случае внедрение таких систем идет поэтапно, с постоянным увеличением оборотного водоснабжения по мере усовершенствования технологии без загрязнения последних.

### Библиографические ссылки

1. Ivanchenko O, Khabibullin R, Le Huong T, Balanov P, Smotraeva I. Toxicity assessment of meat-processing wastewater. E3S Web of Conferences (ICEPP-2020). 2020;161:01044. Doi: 10.1051/e3sconf/202016101044.
2. Мурашов ИД, Хуранов АБ, Пирогова ОМ. Очистка сточных вод мясоперерабатывающих предприятий. В: Актуальные вопросы современной науки и практики. Материалы 12-ой Международной научно-практической конференции, Уфа, 16 мая 2023 г. Уфа: Научно-издательский центр «Вестник науки»; 2023. с. 53–65.
3. Мещерякова ГВ, Погудина ОП. Возможность внедрение оборотного водоснабжения на мясоперерабатывающих предприятиях. В: Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции аспирантов и студентов. Югра: Национальный исследовательский Томский политехнический университет; 2015. с. 335–337.
4. Bailone RL, Borra RC, Fukushima HC, Aguiar LK. Water reuse in the food industry. *Discover Food*. 2022;2:25–42.
5. Warnecke M, Farrugia T, Ferguson C. Review of abattoir water usage reduction, recycling and reuse. *Meat & Livestock: Australia Limited Locked Bag*; 2008. p. 28–31.

### References

1. Ivanchenko O, Khabibullin R, Le Huong T, Balanov P, Smotraeva I. Toxicity assessment of meat-processing wastewater. E3S Web of Conferences (ICEPP-2020). 2020;161:01044. Doi: 10.1051/e3sconf/202016101044.
2. Murashov ID, Khuranov AB, Pirogova OM. *Ochistka stochnykh vod myasopererabatyvayushchikh predpriyatii* [Wastewater treatment of meat processing plants]. In: *Aktual'nye voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Materialy 12-oy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoy konferencii. Ufa, 2023 May 16*. Ufa: Research and Publishing Center «Bulletin of Science»; 2023. p. 53–65. Russian.
3. Meshcheryakova GV, Pogudina OP. *Vozmozhnost' vnedrenie oborotnogo vodosnabzheniya na myasopererabatyvayushchikh predpriyatiyakh* [Possibility of introducing recycled water supply at meat processing enterprises]. In: *Ekologiya i bezopasnost' v tekhnosfere: sovremennye problemy i puti resheniya: sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii aspirantov i studentov*. Ugra: National Research Tomsk Polytechnic University; 2015. p. 335–337. Russian.
4. Bailone RL, Borra RC, Fukushima HC, Aguiar LK. Water reuse in the food industry. *Discover Food*. 2022;2:25–42.
5. Warnecke M, Farrugia T, Ferguson C. Review of abattoir water usage reduction, recycling and reuse. *Meat & Livestock: Australia Limited Locked Bag*; 2008. p. 28–31.

Статья поступила в редакцию 05.03.2024.  
Received by editorial board 05.03.2024.

## ВЛИЯНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ВЫБРОСЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СОКРАЩЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Е. И. БЕРТОШ<sup>1,2</sup>, И. П. НАРКЕВИЧ<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Бел НИЦ «Экология»,  
ул. Якубова, 76, 220095, г. Минск, Беларусь

Оценка выбросов парниковых газов является основой для выполнения международных обязательств стран, ратифицировавших Рамочную конвенцию Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН) и Парижское соглашение, включая Республику Беларусь. Результаты оценки также необходимы при подготовке национальных кадастров парниковых газов, планировании целей по снижению выбросов парниковых газов и при разработке национальных стратегий низкоуглеродного развития на перспективу до 2050 г. В настоящее время в Республике Беларусь отсутствует комплексный нормативно-правовой документ, определяющий долгосрочные направления снижения выбросов парниковых газов различных отраслей экономики, принятие которого требуется, в частности, для реализации положений Парижского соглашения. Некоторые мероприятия предусмотрены программами и стратегиями развития отдельных отраслей экономики на ближайший пятилетний период (2021–2025 гг.) и до 2030 г. В частности, предполагается обеспечить выбросы парниковых газов в 2030 г. ниже уровня 1990 г. на 35–40 % за счет реализации различных мер в области повышения энергоэффективности национальной экономики, ресурсосбережения, развития и внедрения технологий безопасной утилизации отходов, устойчивого управления лесами. Мероприятия по сокращению выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве в рамках национальной цели по снижению выбросов парниковых газов пока не рассматриваются. Вместе с тем сельское хозяйство значительно влияет на выбросы парниковых газов, а его вклад в общенациональные выбросы постоянно увеличивается. Следовательно, необходима разработка и реализация определенных мероприятий по сокращению выбросов парниковых газов в этом секторе. Цель данного исследования – анализ выбросов парниковых газов, происходящих в результате производства сельскохозяйственной продукции за 1990–2021 гг. Для этого определены основные источники выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве, проанализирована эффективность различных мероприятий по сокращению их выбросов, а также предложены приоритетные направления для снижения антропогенного воздействия сельского хозяйства на климат, что может стать основой для разработки долгосрочной стратегии низкоуглеродного развития в Республике Беларусь.

**Ключевые слова:** парниковые газы; низкоуглеродное развитие; устойчивое сельское хозяйство; меры по сокращению выбросов; углеродное земледелие; климатически-ориентированные технологии.

### Образец цитирования:

Бертош ЕИ, Наркевич ИП. Влияние сельскохозяйственного производства на выбросы парниковых газов и направления их сокращения в Республике Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;1:93–101. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-93-101>

### For citation:

Bertosh EI, Narkevitch IP. The impact of agricultural production on the emissions of greenhouse gases and the directions to reduce them in the Republic of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023;4:93–101. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-93-101>

### Авторы:

**Иван Петрович Наркевич** – доктор технических наук, доцент; профессор кафедры экологического мониторинга и менеджмента<sup>1</sup>; старший научный сотрудник, отдела международного научного сотрудничества и климата<sup>2</sup>.  
**Евгения Ивановна Бертош** – аспирант кафедры экологического мониторинга и менеджмента<sup>1</sup>; заместитель заведующего отделом международного научного сотрудничества и климата<sup>2</sup>.

### Authors:

**Ivan P. Narkevich**, doctor of science (technical), docent; professor at the department of environmental monitoring and management<sup>a</sup>; senior researcher at the department of international scientific cooperation and climate<sup>b</sup>.  
[ivan.narkevitch@mail.ru](mailto:ivan.narkevitch@mail.ru)  
**Evgeniya I. Bertosh**, graduate student at the department of environmental monitoring and management<sup>a</sup>; deputy head of the department of international scientific cooperation and climate<sup>b</sup>.  
[ebertosh@gmail.com](mailto:ebertosh@gmail.com)

## THE IMPACT OF AGRICULTURAL PRODUCTION ON THE EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES AND THE DIRECTIONS TO REDUCE THEM IN THE REPUBLIC OF BELARUS

*E. I. BERTOSH<sup>a, b</sup>, I. P. NARKEVITCH<sup>a, b</sup>*

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

*<sup>b</sup>Bel SIC «Ecology»,*

*76 Jakubava Street, Minsk 220095, Belarus*

*Corresponding author: I. P. Narkevich (ivan.narkevitch@mail.ru)*

The assessment of greenhouse gas emissions is the basis for fulfilling of the international obligations of countries that have ratified the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Paris Agreement, including the Republic of Belarus. The results of its assessment are required for the preparation of the Greenhouse Gas Emissions Inventory Reports, goals for reduction of greenhouse gas emissions and the development of national long-term low-carbon strategies until 2050. Currently, the Republic of Belarus does not have a comprehensive document defining long-term directions for the reducing of greenhouse gas emissions in r various sectors of the economy, the adoption of which is necessary, in particular, for the implementation of the requirements of the Paris Agreement. Some of the measures for reduction of greenhouse gas emissions activities have been implemented by programs and strategies for the development of individual sectors of the economy for the next five-year period for 2021–2025 and up to 2030. In particular, it is expected to ensure greenhouse gas emissions in 2030 below the 1990 emission level by 35–40 % through the implementation of various measures to improve the energy efficiency of the national economy, resource saving, development and implementation of technologies of waste management, sustainable forest use. Measures to reduce greenhouse gas emissions in agriculture within the framework of the national goal to reduce greenhouse gas emissions have not yet been considered. At the same time, agriculture has a significant impact on greenhouse gas emissions and its contribution to national emissions is constantly increasing. Therefore, it is necessary to develop and implement certain measures to reduce greenhouse gas emissions in this sector. The purpose of this article is to analyze greenhouse gas emissions resulting from agricultural production over the period 1990–2021. For this purpose, the main sources of greenhouse gas emissions in agriculture have been identified, and priority areas for reducing of anthropogenic impact have been proposed that can be laid down for to the national strategy of low-carbon development of the Republic of Belarus.

**Keywords:** greenhouse gases; low-carbon development; sustainable agriculture; measures to reduce emissions; carbon farming; climate-smart technologies.

### Введение

Сельское хозяйство является важным сектором экономики Республики Беларусь, обеспечивающим продовольственную безопасность, создающим трудовой и социальный потенциал для развития сельской местности. Вместе с тем оно вносит существенный вклад в выбросы парниковых газов, являясь вторым по значимости источником выбросов в стране после сектора энергетики [1]. Традиционные практики ведения сельского хозяйства оказывают огромное влияние на климат, приводят к значительным объемам выбросов парниковых газов, а также усугубляют ряд таких экологических проблем, как деградация почв, загрязнение земель и водных объектов, потеря биоразнообразия.

Без принятия должных мер по сокращению выбросов парниковых газов влияние сектора может только увеличить его вклад в рост общенациональных выбросов парниковых газов и нивелировать все усилия государства, направленные на их ограничение, осуществляемые в рамках установленной национальной цели – сокращение к 2030 г. на 35–40 % от уровня 1990 г. Реализация данной цели планируется, в основном, путем выполнения мероприятий, предусмотренных действующими программами развития в области повышения энергоэффективности национальной экономики, ресурсосбережения, развития и внедрения технологий безопасной утилизации отходов, а также устойчивого управления лесами.

В соответствии с требованиями Парижского соглашения каждые пять лет эта национальная цель должна быть пересмотрена в сторону ее повышения. Уже к концу 2025 г. Правительством республики должна быть принята более амбициозная цель с горизонтом ее реализации до 2035 г. Кроме того, Парижском соглашением установлено требование к его сторонам по разработке стратегий низкоуглеродного развития до 2050 г. В настоящее время в стране такая стратегия еще не утверждена.

Таким образом, основные цели по снижению антропогенной нагрузки на изменения климата в Республике Беларусь распространяются на горизонт до 2030 г., при этом потенциал сельского

хозяйства на сокращение выбросов парниковых газов не учитывается, а долгосрочные ориентиры низкоуглеродного развития пока еще не определены.

Цель исследования – определение приоритетных направлений и мер для сокращения выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве Республики Беларусь на долгосрочную перспективу.

### Материалы и методы исследования

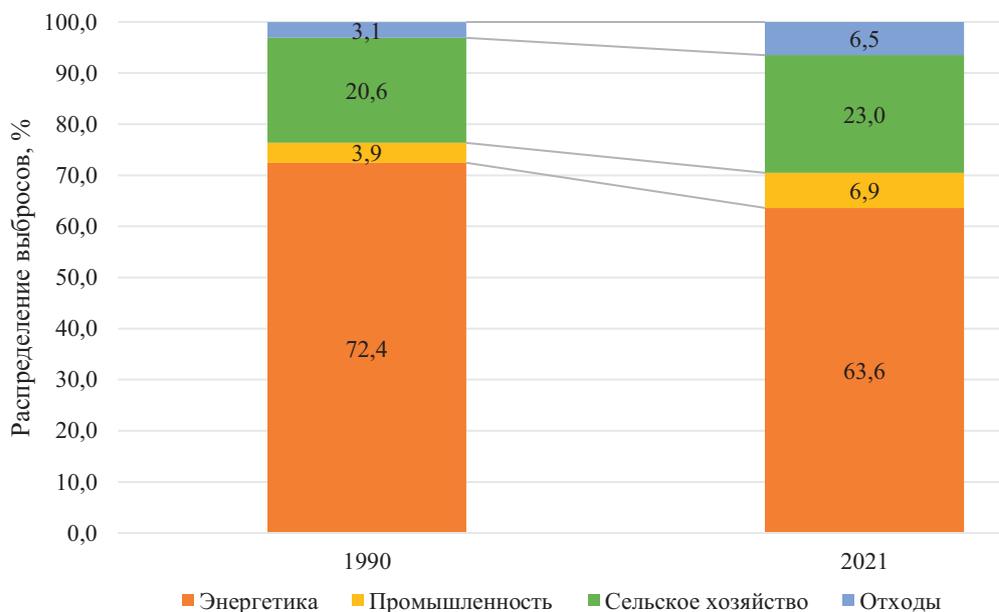
Для подготовки исследования использовались последние опубликованные данные государственного учета антропогенных выбросов из источников абсорбции и поглотителей парниковых газов за 1990–2021 гг., рассчитанные с помощью методических указаний для подготовки национальной отчетности парниковых газов [1; 2].

Приоритетные направления по сокращению выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве были сформированы на основании анализа литературных источников отечественных и зарубежных авторов, национального и международного законодательства в области изменения климата.

Изменение содержания углерода на землях при переходе от традиционных методов возделывания почв к устойчивым формам различных технологий углеродного земледелия рассчитано с использованием данных и методик, описанных в [2].

### Результаты исследования и их обсуждение

По данным [1], выбросы парниковых газов в Республике Беларусь в 2021 г. составили 91 988,2 тыс. т в эквиваленте CO<sub>2</sub>. При этом значительная их часть – 23,0 % приходится на сектор «сельское хозяйство». В 1990 г. доля отрасли была несколько ниже и составляла 20,6 %.



Примечание. Составлено автором по материалам [1]

Рис. 1. Выбросы парниковых газов по секторам экономики

Fig. 1. Greenhouse gases emissions by economy sectors

В данном секторе учитываются следующие категории источников [1; 2]:

- выбросы CH<sub>4</sub> от внутренней ферментации домашнего скота;
- прямые и косвенные выбросы CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O в результате уборки, хранения и использования навоза;
- прямые и косвенные выбросы N<sub>2</sub>O от пахотных почв, включая применение минеральных удобрений, запахивание растительных остатков, культивацию торфяных почв и др.;
- выбросы CO<sub>2</sub> от известкования почв и внесения карбамида (мочевины).

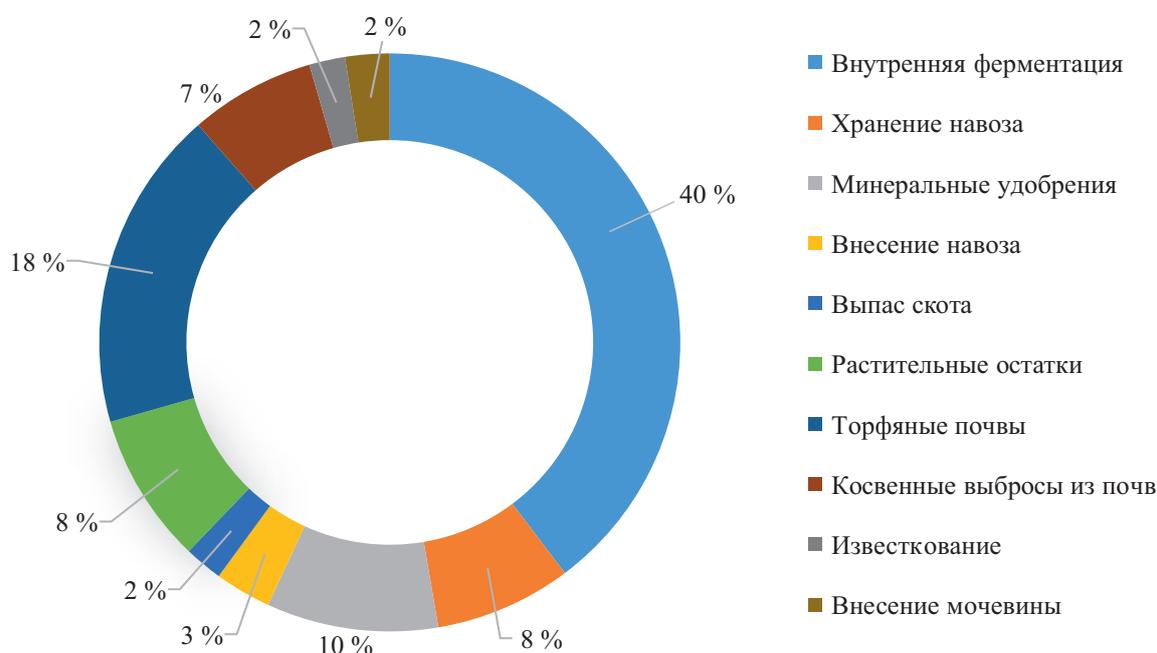
Выбросы парниковых газов, связанные с потреблением энергетических и топливных ресурсов на нужды сельского хозяйства, согласно методическим требованиям для ведения государственного кадастра антропогенных выбросов из источников и их абсорбции поглотителями парниковых газов (далее – кадастр парниковых газов), включаются в сектор «энергетика» и учитываются совместно с лесным и рыбным

хозяйством, а изменение содержания запасов углерода на сельскохозяйственных землях рассматриваются в секторе «землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство».

По данным кадастра парниковых газов, выбросы от источников в секторе сельское хозяйство в 2021 г. составили 21 178,9 тыс. т в эквиваленте CO<sub>2</sub>, где наибольшее количество – 49 % связано с обработкой сельскохозяйственных почв. Сюда входят прямые выбросы закиси азота от возделывания торфяных почв – 18 %, внесения минеральных (азотных) удобрений – 10, растительных остатков – 8, навоза в почвы – 3, выпаса скота – 2 %, а также косвенные выбросы закиси азота в результате улетучивания в атмосферу и выноса азота в водные объекты (выщелачивания) – 7 %.

Естественные процессы внутренней ферментации, происходящие у сельскохозяйственных животных, служат источником около 40 % выбросов в секторе. Из них 97 % выбросов приходится на крупный рогатый скот (КРС) [1]. Помимо этого, хранение образующегося навоза до его внесения в почву в качестве органических удобрений добавляет еще 7 % выбросов по сектору.

Внесения известковых материалов и мочевины приводит к незначительному количеству выбросов парниковых газов – около 2 % каждый источник соответственно (рис. 2).



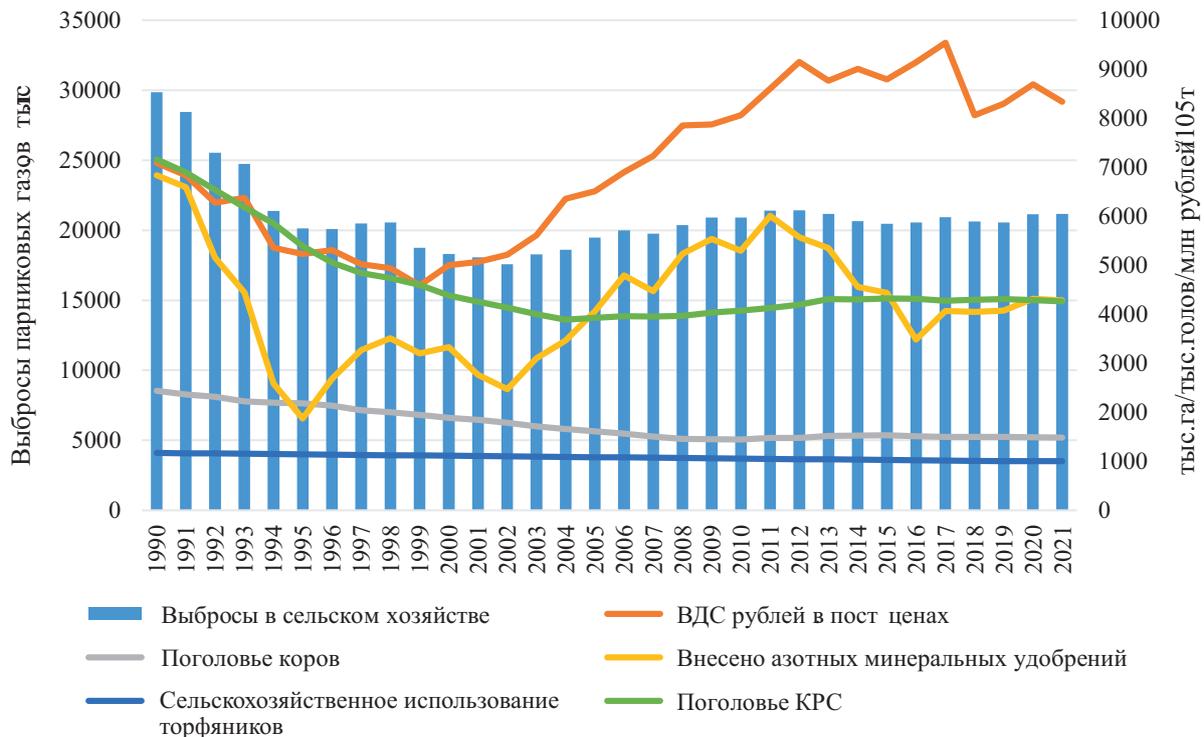
Примечание. Составлено авторами по материалам [1].

Рис. 2. Распределение выбросов парниковых газов в секторе сельское хозяйство по категориям источников  
Fig. 2. Contribution of different greenhouse gases emission sources by categories

За 1990–2021 гг. выбросы в сельском хозяйстве сократились на 29,1 %. Оно связано с существенным падением сельскохозяйственного производства в период 1990–1999 гг., которое было вызвано ухудшением экономической ситуации в стране после распада Советского Союза. В результате чего валовая добавленная стоимость сельского хозяйства сократилась на 35,3 %. Наряду с этим, снижение выбросов парниковых газов в 2021 г. по сравнению с базовым периодом – 1990 г. связано с сокращением потребления азотных удобрений на 37,4 %, уменьшением среднегодового поголовья КРС на 40,4 %, а также выводом из сельскохозяйственного использования около 167 тыс. га осушенных торфяных почв [1].

Следует отметить, что несмотря на сокращение объема выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве по сравнению с 1990 г., их доля в общем объеме таких выбросов возросла и составила в 2021 г. 23,0 % (рис. 1).

В течение рассматриваемого периода (1990–2021 гг.) снижение выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве наблюдалось до 2002 г., после чего вслед за ростом выпуска сельскохозяйственной продукции на 59,8 %, потребления азотных удобрений на 73,1 % наблюдается увеличение выбросов парниковых газов в отрасли на 17,2 % (рис. 3).



Примечание. Составлено автором по материалам [1; 3; 4].

Рис. 3. Динамика выбросов парниковых газов и основных факторов, влияющих на них в секторе сельское хозяйство

Fig. 3. Greenhouse gases emission trends and its key drivers in the agriculture

Итак, тенденции выбросов парниковых газов в секторе указывают на их тесную связь с темпами экономического развития, а также объемами потребления основных экономических ресурсов, в том числе земельных. Без принятия должных мер дальнейшее наращивание производства сельскохозяйственной продукции непременно приведет к росту выбросов парниковых газов. Согласно некоторым прогнозным оценкам [5], ожидается, что выбросы в сельском хозяйстве повысятся в 2030 г. на 22,1 % по сравнению с текущим уровнем, составив 25 863,8 тыс. т в эквиваленте CO<sub>2</sub>. При этом выбросы все еще будут ниже базового 1990 г. на 13,4 %. Однако, учитывая необходимость каждые пять лет повышать обязательства по Парижскому соглашению по сокращению выбросов парниковых газов, а также снижение потенциала других секторов ограничивать выбросы, в дальнейшем потребуются поиск новых мер и внедрение инновационных технологий по сокращению выбросов парниковых газов, в том числе в сельском хозяйстве.

В стратегиях по декарбонизации экономик различных стран мира в качестве мер, влияющих на сокращение выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве, предусматриваются мероприятия по повышению энергоэффективности за счет внедрения возобновляемых источников энергии, снижения потребления топливно-энергетических ресурсов и удобрений, по управлению кормлением для снижения выбросов внутренней ферментации, утилизации отходов сельского хозяйства с целью производства биогаза на биогазовых установках, накоплению углерода в биомассе и почве, а также проведению научных исследований в этой области. При этом отмечается, что наибольшим эффектом на сокращение выбросов парниковых газов обладают меры, влияющие на накопление углерода – поглощение CO<sub>2</sub> на сельскохозяйственных землях [6]. К ним относятся такие практики землепользования, которые способствуют повышению плодородия почв, предотвращению деградации земель, устойчивому управлению пахотными и луговыми землями.

В последние годы в мировой практике ведения сельского хозяйства стало активно внедряться «углеродное земледелие», которое представляет собой совокупность сельскохозяйственных агротехнических приемов, направленных на улавливание (депонирование) атмосферного углерода в почве, биомассе и подстилке. В частности, углеродное земледелие базируется на многих сельскохозяйственных технологиях [7–8]. Некоторые из них рассмотрены ниже.

**Ресурсосберегающие технологии обработки почв (минимальная/нулевая вспашка).** Ресурсосберегающие технологии выращивания сельскохозяйственных культур предполагают минимизацию

или отказ от механической обработки почвы; сохранение растительных остатков на поверхности почвы (мульчирование); планирование севооборотов, включающих рентабельные культуры и культуры, улучшающие плодородие почв; интегрированный подход в борьбе с вредителями и болезнями; использование качественных семян, отзывчивых к данным технологиям [9].

По данным некоторых исследований, за счет применения ресурсосберегающих технологий обработки почв повышается урожайность выращиваемых сельскохозяйственных культур, снижаются затраты на топливо, сохраняется почвенная влага, плодородие почвы [10]. При этом при переходе на технологии минимальной обработки почвы среднее накопление углерода на землях с минимальной вспашкой в среднем составит 524 кг С/га в год, что эквивалентно поглощению 1,9 т  $\text{CO}_2$ /га в год обрабатываемых земель. Отказ от вспашки приведет к ежегодному накоплению 753 кг С/га или поглощению на 2,8 т  $\text{CO}_2$ /га в год [2]. Здесь следует отметить, что изменение содержания углерода при переходе от одного режима землепользования к другому происходит в среднем в течение 20 лет, после чего баланс углерода приходит в равновесное состояние, где ежегодное накопление углерода будет соответствовать его потерям.

**Органическое земледелие** предусматривает отказ от применения синтетических форм удобрений и добавок, а также пестицидов и характеризуется большим поступлением органических веществ в почву за счет внесения органических форм удобрений (компост, навоз), мульчирования, выращивания покровных культур. Благодаря большому количеству поступления органики, повышается плодородие почв и минимизируются климатические изменения путем увеличения накопления углерода в почвах.

В сравнении с традиционной практикой выращивания сельскохозяйственных культур переход на органическое земледелие будет способствовать ежегодному накоплению 914 кг углерода/га или поглощению 3,4 т в эквиваленте  $\text{CO}_2$  в течение 20 лет.

**Точное земледелие** – это комплексная система сельскохозяйственного планирования, позволяющая управлять урожайностью с помощью различных информационных технологий. Управление урожайностью сельскохозяйственных культур достигается за счет дифференцированного подхода к определению оптимальных доз удобрений и семян на различных участках поля, исходя из анализа данных аэрокосмических снимков, структуры и состава почвы, погодных условий и т. д.

Применение точного земледелия позволяет повысить эффективность и производительность на каждом этапе сельскохозяйственных работ, оптимизировать количество вносимых материалов, снизить затраты на топливо и удобрения, а также увеличить урожайность [11]. Помимо экономических выгод, связанных с сокращением материальных ресурсов на внесение минеральных удобрений и добавок в почву, а также получения прибыли с прибавкой к урожаю, внедрение системы точного земледелия снижает антропогенную нагрузку на почвы, улучшает их экологическое состояние, снижает уровень загрязненности водных объектов, благоприятно сказывается на биоразнообразии.

За счет перехода на точное земледелие возможно накопить в среднем в год в течение 20-летнего периода 262 кг углерода/га, что эквивалентно поглощению 1 т  $\text{CO}_2$ /га.

**Управление луговыми угодьями и недопущение их деградации.** Одним из направлений углеродного земледелия, влияющего на увеличение поглощения  $\text{CO}_2$ , является повышение продуктивности луговых угодий (сенокосы и пастбища) посредством регулирования выпаса скота, дифференцированного внесения органики, а также улучшения посевов трав путем перезалужения травостоев. При этом ежегодное накопление углерода на управляемых луговых угодьях в течение 20 лет составит 1,5 т/га или приведет к поглощению 5,5 т  $\text{CO}_2$ /га в год. Все эти приемы позволяют не только положительно воздействовать на климат, но и существенным образом улучшить видовой состав луговой растительности, а также качество и урожайность кормовых угодий.

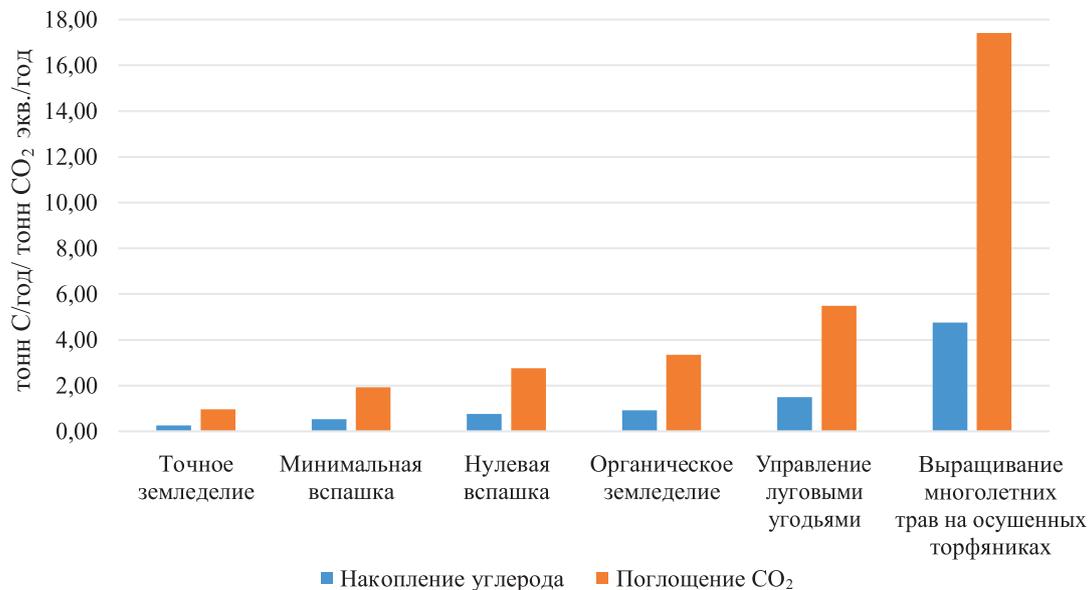
**Предотвращение деградации осушенных торфяных почв.** Осушенные торфяные почвы характеризуются большими потерями органического вещества, что приводит к ускорению процессов их деградации.

В зависимости от характера использования торфяников в сельском хозяйстве ежегодно теряется от 0,25 до 5 т углерода (или выбросам от 0,9 до 18 т в эквиваленте  $\text{CO}_2$ ) на гектар возделываемой площади, где наибольшие потери органического вещества наблюдаются при выращивании пропашных культур, наименьшие при выращивании многолетних трав [2].

В этой связи рациональное использование осушенных торфяников в сельском хозяйстве (преимущественно для выращивания многолетних трав) обеспечит минимальные потери органического вещества и сохранит плодородие осушенных торфяных почв [12]. Среднее сокращение потерь углерода при выращивании многолетних трав по сравнению с пропашными культурами составит 4,75 т/га или 17,4 т  $\text{CO}_2$ /год.

Как видно из представленных данных (рис. 4), наибольшее поглощение выбросов парниковых газов может быть достигнуто за счет перехода к выращиванию многолетних трав на осушенных

торфяников, управления луговыми землями, наименьшее поглощение выбросов наблюдается при переходе на точное земледелие. Однако здесь не учитывается эффект от сокращения выбросов от уменьшения использования минеральных удобрений за счет их точного дозирования.



Примечание. Составлено авторами на основании выполненных расчетов по методике [2].

Рис. 4. Изменение содержания углерода / поглощение CO<sub>2</sub> при переходе на различные технологии «углеродного земледелия» по сравнению с традиционной технологией выращивания сельскохозяйственных культур

Fig. 4. Carbon stock change during the transition to various «carbon farming» technologies compared to the traditional technology of crop production

Следует отметить, что большинство из перечисленных выше мер являются частью существующей национальной политики Республики Беларусь в области развития сельского хозяйства, охраны окружающей среды и климата. В частности, Государственная программа «Аграрный бизнес на 2021–2025 гг., утвержденная Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 1 февраля 2021 г. № 59, в качестве приоритетных направлений, имеющих отношение к сокращению выбросов парниковых газов, предусматривает развитие органического земледелия; мероприятия по сохранению почвенного плодородия; развитие точного земледелия.

В соответствии с государственной Программой «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2021–2025 гг., утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 февраля 2021 г. № 99, предполагается разработка и реализация проектов по экологической реабилитации торфяников, включая разработку научных обоснований и проектно-сметной документации.

Закон Республики Беларусь от 18 декабря 2019 г. № 272-3 «Об охране и использовании торфяников» и Стратегия сохранения и рационального (устойчивого) использования торфяников, утвержденная Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 30.12.2015 № 1111 определяют, что осушенные торфяные почвы должны преимущественно использоваться под выращивание многолетних трав и выпас сельскохозяйственных животных. Государственной программой «Энергосбережение» на 2021–2025 гг., утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 24 февраля 2021 г. № 103, планируется строительство локальных биогазовых комплексов на отходах сельского хозяйства. В рамках Государственных научно-технических программ ГНТП «Инновационные агропромышленные и продовольственные технологии» (2021–2025 гг.), входящей в Перечень государственных программ научных исследований на 2021–2025 гг., утвержденный Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 27 июля 2020 г. № 438, осуществляется финансирование научных исследований в области внедрения эффективного производства сельскохозяйственной продукции и продовольствия в объемах, достаточных для внутреннего рынка и формирования экспорта при условии сохранения природных ресурсов посредством разработки и освоения в производстве новых подходов и технологий в области экономики и управления сельскохозяйственным производством, сохранения почвенного плодородия, земледелия, растениеводства, животноводства, кормопроизводства, производства продуктов питания, средств механизации.

Из проведенного анализа следует, что в Республике Беларусь реализуется комплекс конкретных мер, влияющих на снижение или сдерживание роста выбросов парниковых газов от сельскохозяйственной деятельности, а также на увеличение депонирования углерода на сельскохозяйственных землях. Однако для демонстрации влияния этих мер на сокращение выбросов парниковых газов необходимо при подготовке кадастра парниковых газов вести учет площадей сельскохозяйственных земель, возделываемых с помощью различных приемов, на основании которого можно выполнить оценку накопления углерода на сельскохозяйственных землях, происходящего в результате перехода от традиционных форм земледелия к климатически-ориентированному сельскому хозяйству [2]. Кроме того, необходимо проводить научные исследования в области влияния различных технологий на изменение запаса углерода на различных типах почв.

### Заключение

Таким образом, текущие тенденции выбросов парниковых газов демонстрируют их снижение относительно базового периода на 29,1 %. Вместе с этим вклад отрасли в общенациональные выбросы постоянно растет и, согласно прогнозам, в дальнейшем ожидается увеличение выбросов к 2030 г. по сравнению с текущим уровнем на 22,1 %. В настоящее время стоит задача выбора оптимальной модели и методов ведения сельского хозяйства с применением технологий снижения выбросов парниковых газов.

Наибольшим эффектом по сокращению выбросов парниковых газов обладают различные технологии «углеродного земледелия» путем применения наилучших методов возделывания почв и эффективного внесения удобрений. Приоритетными в отношении снижения выбросов парниковых газов могут стать меры в области рационального использования осушенных торфяных почв в сельском хозяйстве, различные приемы и технологии улучшения сенокосов и пастбищ, внедрение органического земледелия, а также другие ресурсосберегающие методы его ведения. Переход к методам устойчивого сельского хозяйства позволяет не только сокращать выбросы парниковых газов, но и повышать его производительность.

Следует отметить, что в Республике Беларусь уже реализуется ряд мер, направленных на сокращение выбросов парниковых газов и их поглощение в сельском хозяйстве в рамках отраслевых стратегий и программ развития. Однако для того чтобы эффект от реализации различных направлений низкоуглеродного сельского хозяйства отражался в кадастре парниковых газов, необходимо вести учет показателей внедрения климатически-ориентированных технологий и практик в Республике Беларусь, основанных на материалах национальных научных исследований.

### Библиографические ссылки

1. Государственный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов Республики Беларусь 1990–2021 гг. [Интернет, процитировано 29 февраля 2024]. РКИК ООН. URL: <https://unfccc.int/documents/273516>.
2. Руководящие принципы проведения национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК. 2006. Том 4. Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования [Интернет, процитировано 29 февраля 2024]: Институт глобальных экологических стратегий (Япония). URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html>.
3. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Интернет, процитировано 29 февраля 2024]. URL: <http://dataportal.belstat.gov.by/>.
4. World Bank Open Data [Internet, cited 2024 February 29]. World Bank. URL: <https://data.worldbank.org/>.
5. Восьмое национальное сообщение Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по рамочной конвенции ООН об изменении климата [Интернет, процитировано 29 февраля 2024]. РКИК ООН. URL: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/8NC\\_BLR.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/8NC_BLR.pdf).
6. Long-term strategies portal [Internet, cited 2024 February 29]. UNFCCC. URL: <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies/>.
7. McDonald H, Frelih-Larsen A, Lóránt A, Duin L, Pyndt Andersen S, Costa G, and Bradley H. Carbon farming – Making agriculture fit for 2030, Study for the committee on Environment, Public Health and Food Safety (ENVI), Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies. Luxembourg: European Parliament; 2021. 67 p.
8. Carbon Farming [Internet, cited 2024 February 29]. Carbon Cycle Institute. URL: [www.carboncycle.org/](http://www.carboncycle.org/).
9. Кузьмицкий АВ, Трофимчук СС. Ресурсосберегающие технологии обработки почвы и посева сельскохозяйственных культур. В: Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК. Материалы международной научно-технической конференции, Минск, 23–24 октября 2009 г. В 2 частях. Часть 2. Минск: БГАТУ; 2009. с. 19–21.
10. Золотарёва ЕЛ, Архипов КВ. Экономическая эффективность применения ресурсосберегающих технологий в растениеводстве. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2011;3:17–42.
11. Якушев ВВ. Точное земледелие: теория и практика. Санкт-Петербург: ФГБНУ АФИ; 2016. 364 с.
12. Семененко НН. Инновационная система земледелия в звене севооборота на антропогенно-преобразованных торфяных почвах Полесья. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. 2017;61:58–69.

## Reference

1. National Greenhouse Gases Inventory Report of the Republic of Belarus for 1990–2021. [Internet, cited 2024 February 29]. Available from: <https://unfccc.int/documents/273516>.
2. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. [Internet, cited 2024 February 29]. Available from: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4>.
3. National State Committee of the Republic of Belarus. [Internet, cited 2024 February 29]. Available from: <http://dataportal.belstat.gov.by/>.
4. World Bank Open Data [Internet, cited 2024 February 29]. World Bank. Available from: <https://data.worldbank.org/>.
5. Eighth National Communication of the Republic of Belarus [Internet, cited 2024 February 29]. Available from: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/8NC\\_BLR.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/8NC_BLR.pdf).
6. Long-term strategies portal [Internet, cited 2024 February 29]. UNFCCC. Available from: <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies/>.
7. McDonald H, Freluh-Larsen A, Lóránt A, Duin L, Pyndt Andersen S, Costa G, and Bradley H. Carbon farming – Making agriculture fit for 2030, Study for the committee on Environment, Public Health and Food Safety (ENVI), Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies. Luxembourg: European Parliament; 2021. 67 p.
8. Carbon Farming [Internet, cited 2024 February 29]. Carbon Cycle Institute. Available from: [www.carboncycle.org/](http://www.carboncycle.org/).
9. Kuzmichsky AV. *Resursosberegayushchie tekhnologii obrabotki pochvy i poseva sel'skokhozyaystvennykh kultur* [Resource-saving technologies for soil and crop cultivation]. In: *Energoberezhenie – vazhneishee usloviye innovatsionnogo razvitiya APK. Materialy mezhdunar. nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Minsk, 2009 October 23–24. V 2 chastyah. Chast 2*. Minsk: BGATU; 2009. p. 19–21. Russian.
10. Zolotareva EL, Archipov KV. *Ekonomicheskaya effektivnost primeneniya resursosberegayuschih tekhnologiy v rastenievodstve* [Economic efficiency of using resource-saving technologies in crop production]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* 2011;3:17–42. Russian.
11. Yakushev VV. *Tochnoe zemledeliye: teoriya i praktika* [Precision Farming: Theory and Practice] Saint Peterburg: FGBNU AFI; 2016. 364 p. Russian.
12. Semenenko NN. *Innovatsionnaya sistema zemledeliya v zvene sevooborota na antropogenno-preobrazovannykh torfyanykh pochvakh Polesya* [Innovative farming system on anthropogenically transformed soils of Polesye]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, agrarian series*. 2017;61:58–69. Russian.

Статья поступила в редколлегию 05.03.2024.  
Received by editorial board 05.03.2024.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Танкевич Е. А., Никитин А. Н., Концевая И. И., Симончик Ю. К.</i> Значение основных физиологических групп микроорганизмов в изменении физико-химических форм техногенных радионуклидов в дерново-подзолистой почве зоны отчуждения Чернобыльской АЭС .....	4
<i>Мальцева С. В., Сыса А. Г., Бученков И. Э., Грицкевич Е. Р., Бирг В. С., Ахмед А. Х. Д.</i> Оценка встречаемости ауксотрофных вариантов некоторых санитарно-показательных микроорганизмов в почвах территорий радиоактивного загрязнения .....	12
<i>Рогинский А. С., Буга С. В.</i> Детальная морфометрическая характеристика личинок каштановой минирующей моли ( <i>Cameraria ohridella</i> Deschka & Dimić, 1986) .....	19

### РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Никитин А. Н., Мищенко Е. В., Солоненко Е. В.</i> Экспериментальный анализ эффективности метода LS-SVM для сглаживания спектров, полученных с использованием малогабаритного сцинтилляционного детектора .....	32
<i>Куликович Д. Б., Власова Н. Г., Висенберг Ю. В., Кузнецов Б. К.</i> Метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории вследствие аварии на ЧАЭС .....	46

### ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Позняк С. С., Степанюк М. А.</i> Эффективность использования методов экстрагирования химических элементов в раствор при пробоподготовке образцов почвы .....	58
<i>Акимов А. Н., Людчик А. М., Мельник Е. А., Павленко П. Н.</i> Твердые частицы в воздухе городов Беларуси .....	70
<i>Секирина А. П., Мисюченко В. М.</i> Анализ возможности внедрения систем оборотного водоснабжения на мясоперерабатывающих предприятиях .....	82
<i>Бертош Е. И., Наркевич И. П.</i> Влияние сельскохозяйственного производства на выбросы парниковых газов и направления их сокращения в Республике Беларусь .....	93

## CONTENTS

### THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Tankevich E. A., Nikitin A. N., Kantsavaya I. I., Simonchyk Yu. K.</i> The importance of the main physiological groups of microorganisms in the change of physico-chemical forms of technogenic radionuclides in the sod-podzolic soil of the exclusion zone of the Chernobyl NPP .....	4
<i>Maltseva S. V., Sysa A. G., Butchenkov I. E., Gritskevitch E. R., Birg V. S., Ahmed A. H. D.</i> Assessment of auxotrophic sanitary-indicative microorganisms occurrence in radiation-contaminated soils.....	12
<i>Roginsky A. S., Buga S. V.</i> Detail morphometric characteristics of the horse-chestnut leaf miner ( <i>Cameraria ohridella</i> Deschka & Dimič, 1986) larvae .....	19

### RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Nikitin A. N., Mischenko E. V., Solonenko E. V.</i> Experimental analysis of the efficiency of gamma-ray spectrum smoothing with LS-SVM when using a compact scintillation detector.....	32
<i>Kulikovich D. B., Vlasova N. G., Visenberg Yu. V., Kuznetsov B. K.</i> Method for reconstructing individualized external exposure dose of persons living in a contaminated area with radionuclides as a result of the Chernobyl accident .....	46

### INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Pazniak S. S., Stepanyuk M. A.</i> Effectiveness of using methods for extraction of chemical elements into solution when sample preparation of soil samples .....	58
<i>Akimov A. N., Liudchik A. M., Melnik A. A., Paulenka P. N.</i> Particulate matter in the air of cities in Belarus.....	70
<i>Sekirina A. P., Misiuchenka V. M.</i> Analysis of the possibility of implementing recycling water supply systems in meat processing enterprises .....	82
<i>Bertosh E. I., Narkevitch I. P.</i> The impact of agricultural production on the emissions of greenhouse gases and the directions to reduce them in the Republic of Belarus.....	93

*Журнал включен Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований по биологическим, сельскохозяйственным и техническим (экология) наукам.*

*Журнал включен в библиографическую базу данных научных публикаций «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).*

**Журнал Белорусского  
государственного университета. Экология.  
№ 1. 2024**

Учредитель:  
Белорусский государственный университет

Юридический адрес: пр. Независимости, 4,  
220030, Минск.

Почтовый адрес: ул. Долгобродская, 23/1,  
220070, Минск.

Тел. 398-89-34, 398-93-44.

[www.iseu.bsu.by](http://www.iseu.bsu.by)

E-mail: [jecology@bsu.by](mailto: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 29.12.2023.  
Тираж 100 экз. Заказ 574.

Республиканское унитарное предприятие  
«Информационно-вычислительный центр  
Министерства финансов Республики Беларусь»  
ЛП № 02330/89 от 3 марта 2014.  
Ул. Кальварийская, 17, 220004, Минск.

© БГУ, 2024

**Journal  
of the Belarusian State University. Ecology.  
No. 1. 2024**

Founder:  
Belarusian State University

Registered address: 4 Niezaliežnasci Ave.,  
220030, Minsk.

Correspondence address: 23/1 Daŭhabrodskaja Str.,  
220070, Minsk.

Tel. 398-89-34, 398-93-44.

[www.iseu.bsu.by](http://www.iseu.bsu.by)

E-mail: [jecology@bsu.by](mailto: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 29.12.2023.  
Edition 100 copies. Order number 574.

RUE «Information Computing Center of the Ministry  
of Finance of the Republic of Belarus».  
License for publishing No. 02330/89, 3 March, 2014.  
17 Kalvaryjskaya Str., 220004, Minsk.

© BSU, 2024