



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

# 2022

---

МИНСК  
БГУ

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

## EDITORIAL BOARD

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

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

---

---

# СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

---

## SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

---

---

УДК 904

### ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОЕ ЗНАЧЕНИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ ОХРАНЫ ДРЕВНИХ ДОРОГ

А. Н. ТИМОФЕЕВ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Воронежский государственный педагогический университет,  
ул. Ленина, 86, 394043, г. Воронеж, Россия

В России мало внимания уделяется таким уникальным историческим и культурным объектам, как древние дороги. Многие дороги, существовавшие в прошлом, не исследованы учеными, сведения о них содержатся в древних рукописях, легендах и преданиях. Отсутствует кадастр древних дорог России, не разработаны должным образом нормативно-правовая система охраны и методика выделения их в разряд историко-культурных памятников и охраняемых территорий. Большинство древнейших дорог России до сих пор не имеют статуса охраняемых территорий или историко-культурных памятников, представляющих собой невосполнимое наследие человечества. В исследовании обращается внимание не только на необходимость придания древним дорогам России статуса памятников и охраняемых территорий, но и предлагаются критерии качественной оценки земель историко-культурного назначения, на которых размещаются древние дороги. Описываются пять основных направлений: 1) хронологическое, включающее три типа историко-культурных дорожных объектов (подземные, наземные и ландшафтные); 2) насыщенность территории дорожными памятниками историко-культурного значения; 3) значимость историко-культурного дорожного объекта для понимания отечественного и мирового культурного и исторического процессов; 4) сохранность историко-культурного дорожного объекта; 5) использование историко-культурного дорожного объекта в образовательной, культурно-просветительной и культовой деятельности. В методике используется хронологический подход к качественной оценке земельных участков историко-культурного назначения, который позволяет производить ее с учетом особенностей исторического и этнокультурного процессов каждой конкретной местности. В основе методологического подхода к оценке земель историко-культурного назначения действует принцип

---

#### Образец цитирования:

Тимофеев АН. Историко-культурное значение и правовые аспекты охраны древних дорог. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;1:4–13. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-4-13>

#### For citation:

Timofeev AN. Historical and cultural significance and legal aspects of protection of ancient roads. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;1:4–13. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-4-13>

---

#### Автор:

Андрей Николаевич Тимофеев – кандидат биологических наук, доцент; заведующий кафедрой экологического образования.

#### Author:

Andrey N. Timofeev, PhD (biology), docent; head of the department of environmental education. [www72@bk.ru](mailto:www72@bk.ru)

оценки земель по историко-культурной значимости объектов, расположенных на данных земельных участках, которые и делают историко-культурными. При этом осуществлялся подбор и обоснование критериев, по которым производится качественная оценка земель историко-культурного назначения. Таким образом, разработанная методика оценки земель историко-культурного назначения представляет собой принцип сравнительной оценки историко-культурных объектов.

**Ключевые слова:** древние дороги; историко-культурный объект; оценка земель; землепользование; охрана памятников.

## HISTORICAL AND CULTURAL SIGNIFICANCE AND LEGAL ASPECTS OF PROTECTION OF ANCIENT ROADS

A. N. TIMOFEEV<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Voronezh State Pedagogical University,  
86 Lenina Street, Voronezh 394043, Russia

In Russia, little attention is paid to such unique historical and cultural sites as ancient roads. Many roads that existed in the past have not been studied by scientists; information about them is contained in ancient manuscripts, legends and traditions. There is no cadastre of ancient roads in Russia, the legal and regulatory system for the protection of ancient roads and the methodology for separating them into the category of historical and cultural monuments and protected areas have not been properly developed. Most of the oldest roads in Russia still do not have the status of protected areas or historical and cultural monuments, which are an irreplaceable heritage of mankind. The article draws attention not only to the need to give the status of monuments and protected areas to the ancient roads of Russia, but also proposes criteria for a qualitative assessment of the historical and cultural lands on which the ancient roads are located. Five main criteria are described: 1) chronological, including three types of historical and cultural road objects - underground, ground and landscape; 2) saturation of the territory with road monuments of historical and cultural significance; 3) the significance of the historical and cultural road object for understanding domestic and world cultural and historical processes; 4) preservation of the historical and cultural road object; 5) the use of a historical and cultural road object in educational, cultural, educational and religious activities. The methodology uses a chronological approach to the qualitative assessment of historical and cultural land plots, which allows it to be carried out taking into account the peculiarities of the historical and ethno-cultural processes of each specific area. The basis of the methodological approach to the assessment of historical and cultural lands in this article is the principle of assessing lands according to the historical and cultural significance of objects located on these land plots, which make these lands historical and cultural. Based on this principle, the selection and justification of criteria were carried out, according to which a qualitative assessment of historical and cultural lands is made. Thus, the development of a method for assessing historical and cultural lands is a method of comparative assessment of historical and cultural objects.

**Keywords:** ancient roads; historical and cultural object; land assessment; land use; protection of monuments.

### Введение

Исторические и культурные процессы, происходившие на огромном пространстве России, в той или иной мере отразились в ее ландшафтах. Информация о них сохраняется в недвижимых историко-культурных памятниках. На протяжении тысячелетий имело место взаимовлияние человека и природной среды. Временной диапазон такого влияния: от эпохи мустье (100 тыс. лет) до современности. Особенности хозяйственной и культурной деятельности народов, населявших Россию от древности до наших дней, сохранились в ландшафтах на всей территории России в виде объектов историко-культурной значимости: дворянские, крестьянские усадьбы, памятники садово-парковой архитектуры, историческая застройка городов, археологические памятники и пр. [5; 7]. Но, как правило, в нашей стране остаются без должного внимания древние коммуникационные сооружения – дороги<sup>1, 2</sup>, которые, по нашему мнению, имеют не меньшую историческую, культурную и эстетическую ценность, чем другие объекты, относящиеся к уникальному наследию человечества. Критерии выделения древних дорог в особо охраняемые территории не разработаны. Отсутствует правовой механизм их охраны.

---

<sup>1</sup>Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 25.12.2018) [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_33773/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/) (дата обращения: 01.01.2021).

<sup>2</sup>Методические рекомендации по отнесению историко-культурных территорий к объектам культурного наследия в виде достопримечательного места. Министерство культуры Российской Федерации [Электронный ресурс]. Письмо от 28 февраля 2017 года № 49-01.1-39-НМ. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456048835> (дата обращения: 01.01.2022).

Многие дороги давно утратили свое функциональное назначение и известны лишь по археологическим изысканиям. Например, древнейшая дорога, найденная у города Ур в Месопотамии – в одном из первых городов шумерской эпохи, дорога Свит-Трек в Великобритании, Бабиновская дорога в России. Они вызывают интерес ученых во многих аспектах, в том числе и как источник информации о культурных объектах быта древних народов, так как в местах пролегания дорог часто обнаруживаются утерянные предметы путешествующих людей [22]. Другая категория дорог относится также к древним, но не утратившим свое функциональное значение до наших дней. Примерами являются остатки некоторых древних дорог в Риме. И, наконец, современные дороги, отличающиеся уникальностью и своеобразием конструктивных решений, например, Крымский мост (Россия), Голянская тоннельная дорога (Китай), Виадук Мийо (Франция) и др. Сохранение таких объектов, как памятников историко-культурного наследия человечества, является актуальной задачей, требующей скорейшего решения. И если в других странах древние дороги находятся под охраной государства, а некоторые включены в международный список охраняемых территорий ЮНЕСКО («Мировое и культурное наследие»), большинство открыто для посещения туристами, то в России все эти процессы находятся пока в начале своего развития [13]. На начало 2020 г. на территории России отмечено 29 объектов, включенных в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, но не один из них не относится к историческим или современным дорогам. Отсутствуют уникальные дороги и в заявках на включение в ближайшем будущем в этот список.

### Материалы и методы исследования

Методология оценки земель историко-культурного назначения предполагает использование принципа историко-культурной значимости размещенных на них объектов. В соответствии с ним выделялись критерии с дальнейшим их обоснованием, по которым может производиться качественная оценка земель историко-культурного назначения и их сравнительный анализ. Алгоритмы применения и конкретизация методических приемов оценки земель историко-культурного назначения с расположенными на них древними дорогами приводятся в дальнейшем изложении.

### Результаты исследования и их обсуждение

Важно учесть, что под охрану государства должны попадать не только сами дороги как объекты охраны, но и примыкающие территории определенной площади, земли историко-культурного назначения [1; 6]. В связи с тем, что последние невозможно рассматривать в отрыве от древних дорожных историко-культурных объектов на них расположенных, необходимо прежде всего дать определение понятия «дорожный историко-культурный объект». Дорожный историко-культурный объект – это недвижимый памятник археологии, истории, культуры, отражающий ход развития истории, культуры, производства, связывающий в прошлом и/или настоящем отдельные антропогенные или природные объекты, осуществляющий пешеходно-транспортную коммуникацию людей. Объекты повышенной историко-культурной значимости представляют собой составную часть культурного и национального достояния страны, являясь одновременно вещественными историческими источниками [11; 18].

Качественная оценка земельных участков дорожного историко-культурного назначения требует системного описания их многообразия [4; 5]. Мы предлагаем использовать следующую классификацию:

а) подземные дорожные историко-культурные объекты – археологические и исторические памятники в виде остатков дорожных сооружений, строений, сопутствующих материальных следов хозяйственной деятельности, могильников, гробниц, дорожных указателей, культурных слоев, скрытых в земле;

б) наземные дорожные историко-культурные объекты – исторические и археологические памятники в виде остатков древних дорог, сооружений, сопутствующих строений, строительных дорожных комплексов и уличных ансамблей, дорожных участков исторической застройки городов и др.;

в) ландшафтные дорожные историко-культурные объекты – дорожные памятники в садово-парковой архитектуре, дорожные участки территорий, уникальный ландшафт которых сформирован человеком намеренно или непреднамеренно в ходе хозяйственного освоения территории, участки дорожных территорий, связанных с узловыми моментами отечественной и мировой истории, подлежащих обязательному сохранению и др.

В основу методологического подхода к оценке земель историко-культурного назначения в настоящей статье положен принцип их оценки по историко-культурной значимости объектов, расположенных на этих земельных участках, которые и делают эти земли историко-культурными. Исходя из этого принципа осуществлялся подбор и обоснование критериев, по которым производится качественная оценка земель историко-культурного назначения. Таким образом, разработка методики оценки земель историко-культурного назначения представляет собой методику сравнительной оценки, историко-культурных объектов. Иными словами, настоящая методика позволяет сравнивать дорожные памятники истории и культуры друг с другом. Ныне действующая система учета и охраны памятников истории и культуры предусматривает

несколько уровней охраны памятников (памятники Федерального значения, местного значения, учтенные и охраняемые в рамках программы ЮНЕСКО и др.). Сам факт отнесения памятников на тот или иной уровень охраны означает различный подход к проблеме их сохранения<sup>3,4</sup>. Поэтому методика качественной оценки земель историко-культурного назначения, основанная на сравнительной оценке размещенных на них историко-культурных объектов, представляет собой дальнейшее логическое развитие уже действующей системы учета памятников истории и культуры.

Памятник считается поставленным на охрану, если он включен в список охраняемых памятников истории и культуры Указом Президента, либо Постановлением правительства Российской Федерации (РФ), или Постановлением администрации субъекта РФ [17; 23]. При этом памятник либо остается в федеральной или муниципальной собственности и передается в ведение госоргана охраны памятников истории и культуры, либо владелец или пользователь памятника, поставленного на охрану, подписывает охранное обязательство, которое является основанием для возбуждения судебного иска в случае нарушения владельцем или пользователем режима его охраны и использования. Кроме того, необходимо иметь в виду, что существует значительный массив неучтенных памятников истории и культуры, который в первую очередь относится к древним дорогам. В большинстве случаев это те дорожные памятники, которые по вышеприведенной классификации отнесены к подземным историко-культурным объектам – археологическим памятникам и ряду подземных сооружений. Как правило, эти объекты бывают в значительной степени разрушены и видоизменены естественными природными и антропогенными процессами. Документальных описаний большинства таких памятников или не существовало, или они утеряны. В силу этого процесс выявления подземных дорожных историко-культурных объектов еще далеко не завершен. В ходе наземных археологических обследований выявляются все новые историко-культурные дорожные объекты, информация о которых поступает в госорганы охраны и использования памятников, где ведется их учет. Они со временем также включаются в списки охраняемых, однако некоторое время являются только учтенными, но не охраняемыми до принятия очередного Постановления Правительства РФ или субъекта федерации [10; 12]. А с учетом отсутствия критериев и четкой системы оценки ценности древних дорог как объектов историко-культурного наследия процесс придания им статуса памятника или охраняемой территории затягивается на неопределенный срок.

В действующем законодательстве используется термин «зона охраны памятника», который представляет собой совокупность трех зон: охранный зона, зона регулирования застройки и зона охраняемого природного ландшафта [8; 17]. В каждой зоне законом оговорены различные ограничения для землепользователей, при этом границы этих зон могут и не совпадать. Кроме этого, в законодательстве упоминается без четкого определения термин «зона охраняемого культурного слоя». Следовательно, территорией дорожного памятника является только одна из перечисленных выше зон – охранный зона памятника. Границы этой зоны, определенные при постановке историко-культурного объекта на учет, рассматриваются как границы земельного участка историко-культурного назначения [9; 14; 19].

Отсутствие критериев качественной оценки земель историко-культурного назначения является еще одной существенной проблемой в создании системы выявления, контроля и охраны дорог как исторических и культурных памятников в России. В силу сложившейся ситуации целесообразно использовать балльную систему оценки качественных показателей земель историко-культурного назначения [3]. Методология балльной оценки территориальных объектов активно формировалась с середины XX в. [2] и была очень популярна в 1970-х годах [15; 16; 21]. Мы предлагаем следующие критерии и их содержание для качественной оценки земель историко-культурного назначения, включающие уникальные древние дорожные объекты.

*Хронологическая оценка.* Древность памятника увеличивает ценность земли, на которой он расположен в связи с тем, что с течением времени плотность заселения территории возрастала и, следовательно, в большинстве случаев памятники более древних периодов встречаются относительно реже. Предлагаемая методика предусматривает дифференцированную качественную оценку земель историко-культурного назначения в зависимости от типов историко-культурных объектов. В силу особенностей историко-культурного процесса в различных регионах нашей страны не представляется возможным выработать единую шкалу балльной оценки для всех историко-культурных объектов, в силу того что этно-культурные различия в регионах дошли до наших дней в разных по типу историко-культурных объектах.

<sup>3</sup>Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 25.12.2018) [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_33773/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/) (дата обращения: 01.01.2021).

<sup>4</sup>Методические рекомендации по отнесению историко-культурных территорий к объектам культурного наследия в виде достопримечательного места. Министерство культуры Российской Федерации [Электронный ресурс]. Письмо от 28 февраля 2017 года № 49-01.1-39-НМ. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456048835> (дата обращения: 01.01.2022).

Историко-культурные объекты, отнесенные к типу подземных, разбиты на 7 групп в приблизительном соответствии с принятой археологической и исторической хронологией историко-культурных процессов на территории России: палеолит–мезолит, неолит, эпоха бронзы, раннего железного века, раннего средневековья, средневековья, нового и новейшего времени. При этом наиболее высокая качественная оценка соответствует наиболее древней группе памятников с последующим уменьшением от группы к группе.

Историко-культурные объекты, отнесенные к типу наземных, разбиты на три хронологических группы с соответствующей балльной оценкой. При этом балльная оценка памятников первой хронологической группы принята за максимум. Оценка следующей хронологической группы существенно выше балльной оценки такой же хронологической группы подземных историко-культурных объектов, так как их встречаемость значительно ниже, чем подземных памятников того же времени. Тем же обусловлена и повышенная балльная оценка следующей и последней хронологической группы наземных историко-культурных объектов.

Историко-культурные объекты, отнесенные к типу ландшафтных, разбиты на две хронологических группы со значительным разрывом в балльной оценке, поскольку огромное большинство наиболее древних ландшафтных памятников не дошло до наших дней в первозданном виде.

Характеристика древних дорожных объектов, а также троп проводится в соответствии с объектами человеческой, в первую очередь строительной деятельностью в каждый отдельно взятый временной интервал. Антропогенные постройки и сооружения определяют дорожные коммуникации людей и коррелируют в уровне развития между собой, усложняясь с течением времени. Изменяются жилые, нежилые, культовые, оборонительные и другие постройки людей, архитектура которых может быть показательна при описании связывающих их дорог или улиц в сельских и городских поселениях. Следовательно, в предлагаемых критериях особое внимание уделяется архитектурной динамике объектов, дороги для которых являются связующим компонентом, отражающим уровень технологического прогресса своего времени.

Подземные историко-культурные дорожные объекты:

1) древнее 8 тыс. лет до н. э. – археологические памятники эпохи палеолита и эппалеолита (мезолита). Остатки сохранившихся троп (или их косвенные признаки), соединяющих разные объекты деятельности древнего человека (долговременные жилые комплексы с остатками сооружений, сезонные стоянки, стоянки в пещерах и под скальными навесами, места погребений, каменные «мастерские», места загона охоты и забоя животных);

2) 8 тыс. лет до н. э. – 4 тыс. лет до н. э. – археологические памятники эпохи неолита и энеолита. Остатки сохранившихся троп (или их косвенные признаки), соединяющих разные объекты деятельности древнего человека: долговременные жилые комплексы с остатками сооружений, сезонные стоянки, могильники, культовые сооружения, каменные «мастерские» и горные выработки сырья для производства орудий труда (кремь, обсидиан, медь), остатки нежилых сооружений (древние ирригационные системы, сооружения для охраны скота и пр.);

3) 4 тыс. лет до н. э. – 10 в. до н. э. – археологические памятники эпохи бронзы. Остатки сохранившихся троп (или их косвенные признаки), соединяющих разные объекты деятельности человека: долговременные жилые комплексы с остатками сооружений (поселения, стоянки), грунтовые и курганные могильники, культовые сооружения, горные выработки сырья для производства орудий труда (камень, руда), производственные мастерские, остатки нежилых сооружений (древние ирригационные системы, сооружения для охраны скота и пр.);

4) 10 в. до н. э. – 5 в. н. э. – памятники раннего железного века. Остатки сохранившихся троп, дорог (или их косвенные признаки), соединяющих разные объекты деятельности человека: селища, городища с остатками оборонительных сооружений, грунтовые и курганные могильники, культовые сооружения, горные выработки (камень, руда), остатки производственных сооружений, сооружений сельскохозяйственного производства (древние ирригационные системы, сооружения для охраны скота и пр.);

5) 6–13 вв. – памятники раннего средневековья. Дороги и их фрагменты (или их косвенные признаки), соединяющие разные объекты деятельности человека: селища, городища, остатки оборонительных сооружений, грунтовые и курганные могильники, сохранившиеся участки культурного слоя в пределах границ исторических центров городов, остатки (фундамента) храмов, соборов, пещерные монастыри и церкви, горные выработки (камень, руда), остатки производственных сооружений, остатки сооружений сельскохозяйственного производства;

6) 14–17 вв. – памятники позднего средневековья. Дороги и их фрагменты (или их косвенные признаки), соединяющие разные объекты деятельности человека: остатки оборонительных сооружений старых городов, сохранившиеся участки культурного слоя в пределах границ исторических центров старинных городов и сел, остатки подземного строительства, сохранившиеся участки старинных кладбищ, остатки (фундаменты) храмов, соборов, пещерные монастыри и церкви, горные выработки, остатки производственных сооружений, остатки сооружений сельскохозяйственного производства;

7) 18–21 вв. – памятники нового и новейшего времени. Дороги и их фрагменты (или их косвенные признаки), соединяющие разные объекты деятельности человека: исторические кладбища (в том числе

действующие), братские воинские захоронения, подземные монастыри и церкви, старинные ирригационные и мелиоративные сооружения, остатки подземного строительства, горные выработки, памятные оборонительные подземные сооружения, подземные транспортные сооружения.

Наземные историко-культурные дорожные объекты:

1) до 13 в. – дороги и их фрагменты (или их косвенные признаки), соединяющие разные объекты деятельности человека: сохранившиеся здания и сооружения жилого и производственного, оборонительного назначения и их остатки, храмы, соборы и монастыри, территории городской застройки, сохранившие историческую планировку до наших дней (памятники градостроительства);

2) 14–17 вв. – дороги и их фрагменты (или их косвенные признаки), соединяющие разные объекты деятельности человека: сохранившиеся здания и сооружения жилого, производственного назначения и их остатки, крепостные сооружения (кремли), храмы, соборы и монастыри, территории городской и сельской застройки, сохранившие историческую планировку до наших дней (памятники градостроительства);

3) 18–21 вв. – дороги и их фрагменты (или их косвенные признаки), соединяющие разные объекты деятельности человека: здания, сооружения, отнесенные решением Правительства РФ и субъектов Федерации к памятникам истории и культуры, территории исторически ценной застройки, дворцово-парковые комплексы, усадебные ансамбли.

Ландшафтные дорожные историко-культурные объекты:

1) до 18 в. – дороги и их фрагменты (или их косвенные признаки), соединяющие разные объекты деятельности человека: участки территорий, уникальные ландшафты которых сформированы человеком намеренно или непреднамеренно в ходе хозяйственного освоения территории, участки территорий, связанных с узловыми моментами отечественной и мировой истории, подлежащие обязательному сохранению по решению Правительства РФ или субъектов Федерации;

2) 13–21 вв. – дороги и их фрагменты (или их косвенные признаки), соединяющие разные объекты деятельности человека: участки территорий, уникальные ландшафты которых сформированы человеком намеренно или непреднамеренно в ходе хозяйственного освоения территории, территории, связанные с узловыми моментами отечественной и мировой истории, подлежащие обязательному сохранению по решению правительства РФ или субъектов Федерации.

*Насыщенность территории дорожными памятниками историко-культурного значения.* В ходе исторического развития критерии выбора мест поселений менялись несущественно, что часто приводило к возникновению на одном и том же месте поселений различных культур в разные эпохи. Отсюда следует, что в местах насыщенных памятниками истории и культуры при более тщательном изучении можно ожидать выявления дорожных сооружений и объектов, представляющих большую историко-культурную ценность. Насыщенность территории историко-культурными объектами существенно влияет на расширение возможностей использования таких территорий в целях организации отдыха и культурно-просветительной деятельности.

Использование этого критерия приводит также к тому, что увеличение количества выявленных и поставленных на учет и охрану дорожных историко-культурных объектов автоматически повышает качественную оценку историко-культурных земель конкретного административного района. Использование такого критерия должно стимулировать выявление историко-культурных объектов во время землеустроительных работ. Каждый поставленный на учет и охрану дорожный памятник дает 1 балл к оценке земельного участка историко-культурного назначения на территории всего административного района.

*Значимость историко-культурного дорожного объекта для понимания отечественного и мирового культурного и исторического процессов.* Уникальность или типичность дорожных памятников для конкретной исторической эпохи и этнокультурной принадлежности, остатки уникальных инженерно-технических сооружений на археологических дорожных памятниках, наличие неизменившихся типичных историко-культурных ландшафтов, связь конкретной территории с узловыми моментами отечественной и мировой истории, повышают ценность изучаемой территории.

В практической деятельности госорганов наметилась тенденция к дифференциации памятников истории и культуры по уровню их охраны и учета, в связи с разрушением ранее существовавшей на территории СССР трехуровневой системы постановки на охрану и учет памятников истории и культуры. Эта тенденция нашла свое отражение практически во всех проектах и законах, направленных на сохранение историко-культурного наследия [17; 23].

Оценка соответственно этому критерию производится по четырем группам:

1) объекты международного значения (внесенные в список ЮНЕСКО); 2) объекты, поставленные на учет и охрану по решению Правительства РФ; 3) объекты, поставленные на учет и охрану решением органов управления субъектов Федерации; 4) вновь выявленные объекты, поставленные на учет в государственных органах охраны историко-культурного наследия РФ, но не охраняемые решениями Правительства РФ, органами управления субъектов Федерации.

*Сохранность историко-культурного дорожного объекта.* Это один из важнейших параметров оценки рассматриваемых земель наряду с критерием значимости. При оценке земель историко-культурного назначения необходимо исходить из того, что не все дорожные объекты, расположенные на этих землях, в равной степени могут быть реставрированы. Так, практически не подлежат реставрации разрушенные участки культурного слоя археологических дорожных памятников. В то же время при наличии полной документации возможно восстановление полностью разрушенных дорог или сопутствующих им сооружений.

Таким образом, перед оценкой историко-культурных земель по критерию сохранности дорожных объектов на них расположенных, необходима предварительная процедура оценки степени разрушенности этих объектов по типам. Оценку земель по критерию сохранности дорожных объектов необходимо проводить с учетом критериев насыщенности и значимости. В этом случае в качественной оценке каждого конкретного земельного участка будет полно отражена специфика процесса историко-культурного развития региона и возможности практического использования данного конкретного историко-культурного объекта.

Весь массив историко-культурных дорожных объектов делится на две оценочные группы по степени сохранности: дорожные памятники плохой сохранности и дорожные памятники удовлетворительной сохранности.

К дорожным памятникам плохой сохранности отнесены:

– подземные историко-культурные объекты с утратой более 60 % площади культурного слоя или первоначального вида;

– наземные историко-культурные объекты с утратой более 60 % от первоначального вида сооружения;

– ландшафтные историко-культурные объекты с утратой более 60 % природных компонентов объекта (компоненты рельефа, растительности и пр.).

К памятникам удовлетворительной сохранности отнесены все историко-культурные объекты, не вошедшие в первую оценочную группу.

*Используемость историко-культурного дорожного объекта в образовательной, культурно-просветительной и культовой деятельности.* При исчислении размера земельного налога целесообразно учитывать характер использования земельного участка. Использование историко-культурных дорожных объектов в целях образовательной, культурно-просветительной и культовой деятельности отвечает коренным потребностям общества, поэтому она должна быть учтена при определении размера налога на землю. Данный критерий отражает существующее положение по использованию конкретного земельного участка. Отнесение земельного участка к той или иной оценочной группе определяется характером использования расположенного на нем дорожного объекта, при этом земельные участки с объектами, используемыми в образовательной, культурно-просветительной и культовой деятельности, получают более высокую оценку. Кроме того, использование этого критерия должно стимулировать землепользователя включать историко-культурные объекты на своих землях в образовательную и культурно-просветительную сферу (туристические маршруты, экскурсионный показ и пр.).

*Методика качественной оценки земель историко-культурного назначения.* Для качественной оценки земельных участков историко-культурного назначения создается специальная комиссия. Членам комиссии должен быть представлен (по запросу в госорганы охраны историко-культурного наследия) список и учетная документация по историко-культурным объектам, поставленным на охрану и учет на территории конкретного района. На каждый земельный участок историко-культурного назначения оформляется протокол его качественной оценки.

В протоколе отражается следующая информация:

1. Полное название историко-культурного объекта, расположенного на земельном участке.

2. Тип историко-культурного объекта (подземный, наземный, ландшафтный).

3. Уровень охраны (международный, федеральный, субъекта Федерации). Номер и дата Постановления о постановке на охрану. В случае, если на рассматриваемом земельном участке находится историко-культурный дорожный объект выявленный, учтенный, но не поставленный на охрану постановлением Правительства РФ или субъекта Федерации, в протокол вписывается дата постановки на учет данного памятника в госоргане охраны историко-культурного наследия и указывается, что памятник учтен, но не поставлен на охрану.

4. Площадь земельного участка. Приводится площадь зоны охраны в границах, утвержденных при постановке памятника на учет и охрану.

5. Полные фамилия, имя и отчество землепользователя для физических лиц, или полное название для юридических лиц.

6. Оценка земельных участков по критериям (в баллах):

• Хронологическая оценка ( $K_x$ ) земельного участка исчисляется таким образом (см. таблицу). В случае если на земельном участке представлены историко-культурные дорожные объекты разного возраста, то оценка производится по наиболее древней датировке памятника.

Хронологическая оценка земельного участка

Chronological assessment of the land plot

Возраст	Типы историко-культурных объектов		
	подземные	наземные	ландшафтные
Старше 8 тыс. л.	7	7	7
8 тыс. л. до н. э. – 4 тыс. л. до н. э.	6		
4 тыс. л. до н. э. – 10 в. до н. э.	5		
10 в. до н. э. – 5 в. н. э.	4		
6–13 вв.	3		
14–17 вв.	2		
18–21 вв.	1	3	5

• Оценка по критерию насыщенности ( $K_n$ ) учитывает количество дорожных объектов историко-культурного значения на территории административного района (каждый поставленный на учет и охрану памятник дает 1 балл к оценке земли на территории административного района). Все земельные участки историко-культурного назначения административного района получают одинаковое количество баллов по этому критерию.

• Оценка по критерию значимости ( $K_3$ ) исчисляется в зависимости от уровня охраны по следующим формулам [22]:

- международный уровень охраны –  $K_3 = K_x \times 3$ ;
- Федеральный уровень охраны –  $K_3 = K_x \times 1,7$ ;
- местный уровень охраны –  $K_3 = K_x \times 1,2$ ;
- учтенные, не охраняемые –  $K_3 = K_x \times 0,3$ .

В последнем случае проводится оценка, если землепользователь подписал охранное обязательство. Зоны исторически ценной застройки городов и поселений, включая дорожные объекты, рассматриваются как совокупность земельных участков местного уровня охраны в случае, если они выделены в Генеральном плане населенного пункта, утвержденном администрацией субъекта Федерации. Соответственно, протоколы качественной оценки земельных участков в границах зоны исторически ценной застройки городов и поселения составляются на каждый из таких земельных участков в отдельности по полной форме.

• Оценка по критерию сохранности ( $K_c$ ) исчисляется по формулам:

– историко-культурные объекты плохой сохранности:

$$K_c = (K_n + K_3)/2;$$

– историко-культурные объекты удовлетворительной сохранности:

$$K_c = K_n + K_3.$$

Отнесение историко-культурного дорожного объекта к группам плохой или удовлетворительной сохранности производится по согласованию с госорганом охраны историко-культурного наследия.

• Оценка по критерию используемости  $K_n$  исчисляется по формуле:

$K_n = K_3 \times 2$ , только для историко-культурных дорожных объектов, используемых в образовательной, культурно-просветительной и культовой деятельности. Если объект не используется, оценка по данному критерию не производится.

7. Суммарная качественная оценка земельного участка историко-культурного назначения ( $K$ ) производится по итоговой формуле:

$$K = K_x + K_n + K_3 + K_c + K_n.$$

Протокол качественной оценки земельного участка историко-культурного назначения подписывается всеми членами комиссии.

### Заключение

Древние дороги России считаются более молодыми в сравнении с таковыми европейских стран, Америки и стран Востока. Многие дороги России, существовавшие в прошлом, не исследованы учеными, сведения о них содержатся в древних рукописях, легендах и преданиях. Отсутствует кадастр древних дорог России, не разработаны должным образом нормативно-правовая система их охраны и методика выделения их в разряд историко-культурных памятников и охраняемых территорий. На основании предложенных пяти критериев возможно проводить качественную балльную оценку земель историко-культурного назначения и проводить анализ ее налоговой стоимости. Используя полученные баллы, исчисляется поправочный коэффициент к ставке земельного налога. Предлагаемая методика направлена на существенное снижение

ставки земельного налога на земельный участок, относящийся к категории земель историко-культурного назначения. Рекомендуется следующая формула исчисления ставки земельного налога на земельный участок историко-культурного назначения ( $N_{и-к}$ ):

$$N_{и-к} = qN,$$

где  $N$  – ставка налога с единицы площади земель, окружающих земельный участок историко-культурного назначения;  $q$  – поправочный коэффициент, исчисляемый по формуле:  $q = K \cdot 0,1$ ,  $K$  – сумма баллов качественной оценки земельного участка историко-культурного назначения (см. выше).

Огромная группа потенциальных дорожных памятников, находящихся на землях различных землепользователей, фактически находятся в полном распоряжении пользователей, поскольку госструктуры охраны памятников не в состоянии осуществлять контроль за их сохранением и использованием, хотя в число этих памятников входят уникальные историко-культурные объекты, ценность которых для России на сегодня невозможно определить.

Стоимость земель сельскохозяйственного и промышленного назначения, на которых расположены историко-культурные памятники, в том числе потенциальные памятники древних дорог, в настоящее время не отличается от стоимости близ расположенных земель тех же землепользователей. Практически полностью отсутствует законодательная база и какие-либо методические рекомендации по оценке и контролю за использованием этих земель. Подобная картина наблюдается и с использованием земель историко-культурного назначения в пределах городов и других поселений. Помимо земельных участков под памятниками, учтенными и поставленными на охрану госорганами историко-культурного наследия, существует значительный массив земель над исторически ценной древнедорожной сетью или древними дорогами, которые эксплуатируются и по сей день в исторических центрах городов и поселений.

Теоретически контроль за использованием этих земельных участков должен осуществляться системой особых государственных органов на основе разработанных и утвержденных Генеральных планов городов и поселений. На практике контроль в известной мере осуществляется только за землями под памятниками, поставленными на охрану. Остальные земли под исторически ценной застройкой, включая древние дороги, фактически находятся вне контроля каких-либо государственных органов, что часто приводит к разрушению исторически сложившегося облика городов и поселений, исчезновению типичной историко-культурной городской среды, что само по себе является невосполнимой утратой национального достояния России. Совершенно не нормальным является тот факт, что платежи за земли в исторических центрах городов производятся на основе общей оценки земель в городах и поселениях. В большинстве стран стоимость земель на участках исторически ценной застройки значительно выше, чем на периферии. На практике это приводит к тому, что такие земли оказываются во владении или пользовании наиболее состоятельной группы землепользователей, которая имеет возможность обеспечивать сохранность историко-культурной среды, сформировавшейся на протяжении длительного времени. Корректировка нормативно-правовой базы, касающейся историко-культурных памятников, необходима в кратчайшие сроки, что позволит сохранить многие уникальные объекты национального достояния России.

### Библиографические ссылки

1. Агеев СА. Градостроительные регламенты как инструмент сохранения историко-культурного наследия. *Архитектурный вестник*. 2005;1:11–15.
2. Арманд ДЛ. *Наука о ландшафте*. Москва: Мысль; 1975. 288 с.
3. Архипов ЮР. Информационный аспект изучения территориальных систем (на примере строительства в Татарии). В: *Математические методы в географии. Тезисы докладов Второго Всесоюзного межведомственного совещания по применению математических методов в географии*. Москва: [б. и.]; 1971. с. 64–65.
4. Афанасьев ЮА, Фомин СА. *Мониторинг и методы контроля окружающей среды*. Москва: Издательство МНЭПУ; 1998. 208 с.
5. Белоусова ИЮ. Особенности ведения государственного земельного кадастра на землях историко-культурного назначения. *Земельный кадастр как механизм управления земельными ресурсами*. Москва: Свиточ; 2002; с. 23–28.
6. Богомяков ИВ. Содержание понятия «земли историко-культурного назначения» в Земельном кодексе Российской Федерации. *Экологическое право*. 2011;1:8–12.
7. Варламов АА, Хабаров АВ. *Экология землепользования и охрана природных ресурсов*. Москва: Колос; 1999. 159 с.
8. Варламов АА, Хисматулов ОТ. *Эффективность системы государственного земельного кадастра*. Москва: Издательство государственного университета по землеустройству; 2001. 104 с.
9. Вершини ВВ, Краева ИЛ. Теоретические положения рационального использования земель объектов историко-культурного назначения. *Землеустройство, кадастр и мониторинг земель*. 2008;1:14–21.
10. Комов НВ. *Российская модель землепользования и землеустройства*. Москва: Издательство Института оценки природных ресурсов; 2001. 622 с.
11. Краева ИЛ. Рациональное использование и охрана земель историко-культурного назначения. *Аграрная наука*. 2007;5:2–4.
12. Краева ИЛ. Территориальное землеустройство объектов историко-культурного назначения. В: *Инновации молодых ученых сельскому хозяйству России. Сборник научных трудов*. Москва: ГУЗ; 2006. с. 138–143.
13. Крассов ОИ. Понятие и содержание правового режима земель. *Экологическое право*. 2003;1:23–31.
14. Кулешова МЕ, Веденина ЮА, редакторы. *Культурный ландшафт как объект наследия*. Москва: Институт Наследия; Санкт-Петербург: Дм. Буланин; 2004. 620 с.

15. Кульневич КК, Преображенский ВС, редакторы. *Ландшафтные исследования*. Москва: Наука; 1966. 127 с.
16. Мухина ЛИ. *Принципы и методы технологической оценки природных комплексов*. Москва: Наука; 1973. 95 с.
17. Ноятов МД. Рациональное использование земель в России. Охрана земель историко-культурного значения при использовании земель сельскохозяйственного назначения в условиях развития экономики. *Правовые вопросы недвижимости*. 2013;1:35–37.
18. Пахомова НВ, Рихтер КК. *Экономика природопользования и охраны окружающей среды*. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского университета; 2003. 220 с.
19. Романенко ГА и др. *Земельные ресурсы России и эффективность их использования*. Москва: РАСХН; 1996. 250 с.
20. Русинов ПС и др. *Временные методические рекомендации по качественной оценке земель историко-культурного назначения*. Воронеж: ЧерноземИМЗ; 1995. 21 с.
21. Семенцов АН, Преображенский ВС, редакторы. *Теоретические основы рекреационной географии*. Москва: Наука; 1975. 223 с.
22. Тимофеев АН. Использование дорог как источник информации при проведении археологических исследований. *Символ науки: международный научный журнал*. Уфа: Омега-сайнс; 2015. с. 13–15.
23. Топорнин БН, редактор. *Юридическая энциклопедия*. Москва: Юрист; 2001. 280 с.

## References

1. Ageev SA. *Gradostroitel'nye reglamenty kak instrument sohraneniya istoriko-kul'turnogo nasledija* [Urban planning regulations as a collection of historical and cultural heritage]. *Arhitekturnyj vestnik* [Architectural Bulletin]. 2005;1:11–15. Russian.
2. Armand DL. *Nauka o landshafte* [Landscape science]. Moscow: Mysl'; 1975. 288 p. Russian.
3. Arhipov JuR. Informacionnyj aspekt izucheniya territorial'nyh sistem (na primere stroitel'stva v Tatarii). In: *Matematicheskie metody v geografii. Tezisy dokladov Vtorogo Vsesojuznogo mezhdvornstvennogo soveshhanija po primeneniju matematicheskikh metodov v geografii* [Mathematical methods in geography. Abstracts of the Second All-Union Interdepartmental Conference on the Application of Mathematical Methods in Geography]. Moscow: [publisher unknown]; 1971. p. 64–65. Russian.
4. Afanas'ev JuA, Fomin SA. *Monitoring i metody kontrolja okruzhajushhej sredy* [Monitoring and methods of environmental control]. Moscow: Izdatelstvo MNJePU; 1998. 208 p. Russian.
5. Belousova IJu. Osobennosti vedenija gosudarstvennogo zemel'nogo kadastra na zemljah istoriko-kul'turnogo naznachenija. *Zemelnyj kadastr kak mehanizm upravlenija zemel'nymi resursami* [Land cadastre as a mechanism for managing land resources]. 2002;1:23–28. Russian.
6. Bogomjakov IV. *Soderzhanie ponjatija «zemli istoriko-kul'turnogo naznachenija» v Zemel'nom kodekse Rossijskoj Federacii*. [The content of «land of historical and cultural purpose» in the Land Code of the Russian Federation]. *Ekologicheskoe pravo* [Environmental law]. 2011;1:8–12. Russian.
7. Varlamov AA, Habarov AV. *Ekologija zemlepolzovanija i ohrana prirodnyh resursov* [Ecology of land use and protection of natural resources]. Moscow: Kolos; 1999. 159 p. Russian.
8. Varlamov AA, Hismatulov OT. *Effektivnost sistemy gosudarstvennogo zemelnogo kadastra* [Efficiency of the State Land Cadastre System]. Moscow: Izdatelstvo gosudarstvennogo universiteta po zemleustrojstvu; 2001. 104 p. Russian.
9. Vershini VV, Kraeva IL. *Teoreticheskie polozenija racional'nogo ispol'zovanija zemel'nyh obektov istoriko-kul'turnogo naznachenija. Zemleustrojstvo, kadastr i monitoring zemel'* [Land management, cadastre and land monitoring]. 2008;1:14–21. Russian.
10. Komov NV. *Rossijskaja model zemlepolzovanija i zemleustrojstva* [Russian model of land use and land management]. Moscow: Izdatelstvo Instituta ocenki prirodnyh resursov; 2001. 622 p. Russian.
11. Kraeva IL. *Racional'noe ispol'zovanie i ohrana zemel'nyh obektov istoriko-kul'turnogo naznachenija* [Rational use and protection of historical and cultural lands]. *Agrarnaja nauka*. 2007;5:2–4. Russian.
12. Kraeva IL. *Territorial'noe zemleustrojstvo ob'ektov istoriko-kul'turnogo naznachenija*. In: *Innovacii molodyh uchenyh sel'skomu hozjajstvu Rossii: sbornik nauchnyh trudov* [Innovations of young scientists to agriculture in Russia: a collection of scientific papers]. Moscow: GUZ; 2006. p. 138–143. Russian.
13. Krassov OI. *Ponjatije i sodержanie pravovogo rezhima zemel'* [The concept and content of the legal regime of lands]. *Ekologicheskoe pravo* [Environmental law]. 2003;1:23–31. Russian.
14. Kuleshova ME, Vedenina JuA, editors. *Kulturnyj landshaft kak ob'ekt nasledija* [Cultural landscape as an object of heritage]. Moscow: Institut Nasledija; Saint Petersburg: Dm. Bulanin; 2004. 620 p. Russian.
15. Kul'nevich КК, Преобразженский VS, editors. *Landshaftnye issledovanija* [Landscape research]. Moscow: Nauka; 1966. 127 p. Russian.
16. Muhina LI. *Principy i metody tehnologicheskoi ocenki prirodnyh kompleksov* [Principles and methods of technological assessment of natural complexes]. Moscow: Nauka; 1973. 95 p. Russian.
17. Nojatov MD. *Racional'noe ispol'zovanie zemel'nyh obektov v Rossii. Ohrana zemel'nyh obektov istoriko-kul'turnogo znachenija pri ispol'zovanii zemel'nyh obektov sel'skohozjajstvennogo naznachenija v uslovijah razvitija jekonomiki* [Rational use of land in Russia. Protection of lands of historical and cultural significance when using agricultural land in the conditions of economic development]. *Pravovye voprosy nedvizhimosti* [Legal issues of real estate]. 2013;1:35–37. Russian.
18. Pahomova NV, Rihter КК. *Ekonomika prirodnopol'zovanija i ohrany okruzhajushhej sredy* [Economics of nature management and environmental protection]. Saint Petersburg: Izdatelstvo Sankt-Peterburgskogo universiteta; 2003. 220 p. Russian.
19. Romanenko GA, et al. *Zemelnye resursy Rossii i effektivnost ih ispol'zovanija* [Land resources of Russia and the efficiency of their use]. Moscow: RASHN; 1996. 250 p. Russian.
20. Rusinov PS, et al. *Vremennye metodicheskie rekomendacii po kachestvennoj ocenke zemel'nyh obektov istoriko-kul'turnogo naznachenija* [Temporary guidelines for the qualitative assessment of historical and cultural lands]. Voronezh: Izdatel'stvo ChernozemIMZ; 1995. 21 p. Russian.
21. Semencov AN, Преобразженский VS, editors. *Teoreticheskie osnovy rekreacionnoj geografii* [Theoretical foundations of recreational geography]. Moscow: Nauka; 1975. 223 p. Russian.
22. Timofeev AN. *Ispol'zovanie dorog kak istochnik informacii pri provedenii arheologicheskikh issledovanij* [The use of roads as a source of information in archaeological research]. In: *Simvol nauki: mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal* [Symbol of Science: An international scientific journal]. Ufa: Omega-sajns; 2015. p. 13–15. Russian.
23. Topornin BN, editor. *Uridicheskaja enciklopedija* [Legal Encyclopedia]. Moscow: Jurist; 2001. 280 p. Russian.

УДК 504.062.2:504.064.2

## МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ И ФОРМИРОВАНИЯ РЕЙТИНГА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

С. А. ДУБЕНОК<sup>1)</sup>, А. Ю. КУЛАКОВ<sup>1)</sup>, Т. П. КОНОНЧУК<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup>Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь,  
ул. Коллекторная, 10, 220004, г. Минск, Беларусь

Разработка рейтинга экологического развития регионов Республики Беларусь обусловлена необходимостью комплексной оценки экологического состояния регионов страны для реализации ее государственной политики в области устойчивого развития и повышения качества окружающей среды, а также для повышения эффективности применения экологических инструментов в рамках международного сотрудничества. На основании анализа международных подходов к формированию и использованию различных рейтинговых оценок экологической направленности выработана концепция рейтинга экологического развития регионов Беларуси на уровне административно-территориальных единиц (районов) и крупных городов (областных центров и г. Минска), разработаны научно-методические подходы к формированию и ведению рейтинга экологического развития. Методология составления рейтинга основана на ранжировании регионов по комплексу показателей, объединенных в три категории. Для рейтинга городов определен 31, а для районов 37 показателей, позволяющих комплексно оценить текущее состояние компонентов природной среды, воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду и вопросы эффективности экологической политики на региональном уровне. Методология рейтинга экологического развития регионов формализована в 2021 г. в виде технического нормативного правового акта – ТКП 17.02-19-2021 «Охрана окружающей среды и природопользование. Рейтинг экологического развития регионов Республики Беларусь. Технические требования». Научно-методическое и практическое обеспечение функционирования рейтинга экологического развития регионов будет осуществлять Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Предусмотрена ежегодная актуализация рейтинга районов и городов Республики Беларусь и публикация данных рейтинга. В 2021 г. РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов» на основании разработанной методики создал информационный ресурс «Рейтинг экологического развития регионов Республики Беларусь», позволяющий автоматизировать процедуру расчета рейтинга экологического развития регионов Беларуси, сделал расчет и составление экологического рейтинга за 2020 г. в разрезе областных центров и г. Минска, результаты которого приведены в исследовании.

**Ключевые слова:** рейтинг; экологическое развитие; показатели рейтинга; воздействие на окружающую среду; охрана окружающей среды.

### Образец цитирования:

Дубенок СА, Кулаков АЮ, Конончук ТП. Методология разработки и формирования рейтинга экологического развития регионов Республики Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;1:14–24.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-14-24>

### For citation:

Dubianok SA, Kulakou AJu, Kononchuk TP. Methodology for developing and ranking the environmental development of the regions of the Republic of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;1:14–24. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-14-24>

### Авторы:

**Снежана Анатольевна Дубенок** – заместитель директора по научной работе.  
**Андрей Юрьевич Кулаков** – младший научный сотрудник.  
**Татьяна Петровна Конончук** – начальник главного управления экологической политики, международного сотрудничества и науки.

### Authors:

**Sniashana A. Dubianok**, deputy director for research.  
[dsnega@list.ru](mailto:dsnega@list.ru)  
**Andrei Ju. Kulakou**, junior researcher.  
[kulakov1@tut.by](mailto:kulakov1@tut.by)  
**Tatyana P. Kononchuk**, head of the main directorate for environmental policy, international cooperation and science.  
[ktp@minpriroda.gov.by](mailto:ktp@minpriroda.gov.by)

## METHODOLOGY FOR DEVELOPING AND RANKING THE ENVIRONMENTAL DEVELOPMENT OF THE REGIONS OF THE REPUBLIC OF BELARUS

*S. A. DUBIANOK<sup>a</sup>, A. Ju. KULAKOU<sup>a</sup>, T. P. KONONCHUK<sup>b</sup>*

*<sup>a</sup>Central Research Institute for Complex Use of Water Resources,  
1 Slavinskaya Street, 2 building, Minsk 220086, Belarus*

*<sup>b</sup>Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus,  
10 Kalekarnaja Street, Minsk 220004, Belarus*

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

The development of a rating for the environmental development of the regions of the Republic of Belarus is conditioned by the necessity of a comprehensive assessment of the environmental state of the country's regions for the implementation of the state policy of the country in the field of sustainable development and improvement of environmental quality, as well as for increasing the efficiency of application of environmental instruments in the framework of international cooperation. Based on the analysis of international approaches to the formation and use of various environmental ratings, the concept of the rating of environmental development of the regions of Belarus at the level of administrative-territorial units (regions) and large cities (regional centers and the city of Minsk) has been developed, scientific and methodological approaches to the formation and maintenance of rating of ecological development. The ranking methodology is based on the ranking of regions according to a set of indicators grouped into three categories. For the rating of cities, 31 indicators were determined, for regions – 37 indicators, which allow for a comprehensive assessment of the current state of the components of the natural environment, the impact of the main types of economic activity on the environment and issues of the effectiveness of environmental policy at the regional level. The methodology for the rating of ecological development of regions was formalized in 2021 in the form of a technical regulatory legal act – TCP 17.02-19-2021 «Environmental Protection and Nature Management. Rating of ecological development of regions of the Republic of Belarus. Technical requirements». Scientific, methodological and practical support for the functioning of the rating of ecological development of regions will be carried out by the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus. An annual update of the rating of regions and cities of the Republic of Belarus and the publication of rating data are provided. In 2021, RUE «Central Research Institute for Complex Use of Water Resources», based on the developed methodology, created the information resource «Ranking of the Environmental Development of the Regions of the Republic of Belarus», which allows automating the procedure for calculating the rating of the ecological development of the regions of Belarus, and calculated and compiled the environmental rating for 2020 year in the context of regional centers and the city of Minsk, the results of which are given in the article.

**Keywords:** rating; ecological development; rating indicators; environmental impact; environmental protection.

### Введение

Оценка состояния природной среды, особенно в районах интенсивной хозяйственной деятельности, является основой для прогнозирования динамики изменения состояния окружающей среды и планирования мер и мероприятий, направленных на рациональное использование природно-ресурсного потенциала и охрану окружающей среды.

Формирование методологии рейтинга экологического развития регионов является крайне важным научным исследованием, дающим основание для использования научного метода сравнительного анализа экологического состояния территорий с учетом предложенных критериев оценки, получения научных выводов о состоянии окружающей среды и тенденциях ее изменения на региональном уровне.

Целью рейтинговых оценок является, с одной стороны, выявление неблагополучных в экологическом отношении регионов, а с другой – стимулирование экологически ориентированного управления развитием регионов как на республиканском, так и на местном уровне.

Итак, экологические рейтинги призваны отражать экологическую эффективность деятельности органов государственного управления, исполнительной власти и предприятий-природопользователей на соответствующих территориях посредством критериев, определяемых на основе системы объективных показателей и индикаторов. В 2020 г. по Плану научных исследований и разработок общегосударственного, отраслевого назначения, направленного на научно-техническое обеспечение деятельности Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь на 2020 г., РУП «ЦНИИКИВР» выполнено исследование по разработке экологического рейтинга развития регионов Беларуси и методологии его формирования.

Согласно концепции рейтинга экологического развития регионов Республики Беларусь, а также на основе анализа многочисленных подходов к различным международным рейтинговым оценкам на уровне стран разработана методология формирования и создан технический нормативный правовой акт – ТКП

17.02-19-2021 (33140) «Охрана окружающей среды и природопользование. Рейтинг экологического развития регионов Республики Беларусь. Технические требования»<sup>1</sup>. Результатом составления рейтинга является ранжирование административных районов, а также областных центров и г. Минска по комплексу показателей, затрагивающих вопросы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, а также вопросы эффективности экологической политики на региональном уровне.

### Материалы и методы исследования

Методологически в основе любой экологической оценки заложен определенный набор показателей и индикаторов, позволяющих комплексно представить экологическую информацию как во времени, так и в пространстве. При выборе и обосновании возможности использования тех или иных показателей для формирования рейтинга экологического развития регионов Республики Беларусь предъявлялись следующие требования:

1. Возможность формирования показателя в разрезе административных районов, областных центров и г. Минска.
2. Периодичность формирования показателя, как правило, не реже 1 раза в год.
3. Срок формирования статистических или иных данных по показателю – не позднее 1 июня года, следующего за отчетным.
4. Возможность расчета показателей в виде удельных показателей (на единицу территории или на душу населения), либо в виде абсолютных показателей с возможностью сравнения с нормативным показателем.
5. Приоритетность использования показателей уже формирующихся в различных наборах экологических показателей, включая статистические, и показателей, используемых в качестве индикаторов в основных государственных программах, стратегиях и планах по вопросам рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды:
  - показатели Совместной системы экологической информации (СЕИС)<sup>2</sup> [1];
  - показатели зеленого роста<sup>3; 4</sup>;
  - показатели целей устойчивого развития (ЦУР)<sup>5</sup> [2–3];
  - показатели НСУР 2030 и Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 гг.<sup>6; 7</sup>;
  - прогнозные показатели Стратегии в области охраны окружающей среды на период до 2025 г.<sup>8</sup>;
  - показатели Водной стратегии Республики Беларусь на период до 2020 года и проекта Стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года<sup>9; 10</sup>;

<sup>1</sup>ТКП 17.02-19-2021 (33140). Охрана окружающей среды и природопользование. Рейтинг экологического развития регионов Республики Беларусь. Технические требования. Минск, 2021.

<sup>2</sup>Официальный сайт Национального статистического комитета Республики Беларусь [Электронный ресурс]. URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayushchaya-sreda/sovместnaya-sistema-ekologicheskoi-informatsii2/> (дата обращения: 15.12.2021).

<sup>3</sup>Оценка зеленой трансформации экономики: Руководство для стран Восточного Партнерства ЕС [Электронный ресурс]. Париж: EaP Green, 2016. 140 с. URL: [http://www.green-economies-eap.org/ru/resources/EaP%20GREEN\\_GGI%20Guide\\_clean\\_RUS\\_Final.pdf](http://www.green-economies-eap.org/ru/resources/EaP%20GREEN_GGI%20Guide_clean_RUS_Final.pdf) (дата обращения: 15.12.2021).

<sup>4</sup>Официальный сайт Национального статистического комитета Республики Беларусь [Электронный ресурс]. URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayushchaya-sreda/pokazateli-zelenogo-rosta/perechen-pokazateley-zelenogo-rosta/> (дата обращения: 15.12.2021).

<sup>5</sup>Национальная платформа представления отчетности по показателям Целей устойчивого развития (ЦУР) [Электронный ресурс]. URL: <http://sdgplatform.belstat.gov.by/> (дата обращения: 15.12.2021).

<sup>6</sup>Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. Одобрена протоколом заседания Президиума Совета Министров Республики Беларусь от 02.05.2017 № 10 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf> (дата обращения: 15.12.2021).

<sup>7</sup>Указ Президента Республики Беларусь от 29 июля 2021 года № 292 «Об утверждении Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы».

<sup>8</sup>Стратегия в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2025 года. Одобрена решение коллегии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 28.01.2011 № 8-Р [Электронный ресурс]. URL: [https://minpriroda.gov.by/ru/new\\_url\\_1670219329-ru/](https://minpriroda.gov.by/ru/new_url_1670219329-ru/) (дата обращения: 15.12.2021).

<sup>9</sup>Водная стратегия Республики Беларусь на период до 2020 года. Утверждена Решением коллегии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 11.08.2011 № 72-Р [Электронный ресурс]. URL: [https://minpriroda.gov.by/ru/new\\_url\\_1649710582-ru/](https://minpriroda.gov.by/ru/new_url_1649710582-ru/) (дата обращения: 15.12.2021).

<sup>10</sup>Стратегия управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года (проект) [Электронный ресурс]. URL: [http://www.cricuwr.by/static/files/ads/water\\_str\\_prj.pdf](http://www.cricuwr.by/static/files/ads/water_str_prj.pdf) (дата обращения: 15.12.2021).

– целевые показатели Государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2021–2025 годы<sup>11</sup>;

– показатели Республиканского плана мероприятий по наведению порядка на земле в 2020 году<sup>12</sup>.

6. Измеримость и сопоставимость показателей в международном контексте для возможности их использования при формировании одновременно национальной и международной отчетности в области охраны окружающей среды.

Дополнительным критерием выбора показателей для формирования экологического рейтинга развития регионов Республики Беларусь являлась их обеспеченность репрезентативными фактическими исходными данными.

В рамках международной отчетности анализировались следующие экологические показатели и рейтинги:

– показатели Совместной системы экологической информации – Shared Environmental Information System (SEIS, СЕИС) [1];

– ключевые экологические индикаторы Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) – Key Environmental Indicators<sup>13</sup>;

– обзор результативности экологической деятельности страны (ОПЭД) – Environmental Performance Review (EPR), организуемый Европейской экономической комиссией ООН<sup>14</sup>;

– показатели в области целей устойчивого развития (ЦУР) [2];

– экологические показатели для применения в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии (ВЕКЦА)<sup>15</sup> при обмене экологическими данными в Европейском субконтиненте;

– индекс результативности экологической деятельности<sup>16, 17</sup> – The Environmental Performance Index (EPI) [4];

– рейтинг экологического управления городов России, разработанный аналитическим центром «Эксперт» в партнерстве с компанией EY («Ernst & Young») по заказу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации<sup>18</sup>;

– национальный экологический рейтинг регионов, проводимый общественной организацией «Зеленый патруль». Рейтинг носит неофициальный характер, рассчитывается с 2007 г. и публикуется с 2008 г.<sup>19</sup>

На основе комплексного анализа показателей, используемых в различных международных рейтингах, и обоснования возможности их применения для расчёта рейтинга экологического развития регионов Республики Беларусь разработана методология, позволяющая ранжировать отдельно города (областные центры и г. Минск) по 31 показателю и отдельно районы по 37 показателям.

Полученные значения показателей сравниваются следующим образом:

– с величиной допустимой антропогенной нагрузки на окружающую среду (при наличии соответствующих значений);

– с целевым значением, установленным для данного показателя в действующих государственных стратегиях, программах и иных документах (при наличии соответствующих значений);

– с величиной показателя за год, предшествующий анализируемому году (устойчивость динамики показателя);

– с показателями соответственно по районам и городам за анализируемый год.

<sup>11</sup>Государственная программа «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2021–2025 годы, утвержденная постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 февраля 2021 г. № 99 (Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь – доступ свободный).

<sup>12</sup>Республиканский план мероприятий по наведению порядка на земле в 2020 году. Утвержден Заместителем Премьер-министра Республики Беларусь В. А. Дворником 27.01.2020 № 06/214-23/94.

<sup>13</sup>Oecd key environmental indicators, 2004 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/31558547.pdf> (дата обращения: 15.12.2021).

<sup>14</sup>Обзоры результативности экологической деятельности [Электронный ресурс]. URL: <http://www.unece.org/env/epr.html> – Дата доступа 15.12.2021.

<sup>15</sup>Руководство ЕЭК ООН по применению экологических показателей для стран ВЕКЦА, 2007 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/europe/monitoring/Publications/Indicators\\_Assessment/documents/Publication.Indicators\\_Reporting\\_ECE-CEP-140\\_Rus\\_final.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/europe/monitoring/Publications/Indicators_Assessment/documents/Publication.Indicators_Reporting_ECE-CEP-140_Rus_final.pdf) (дата обращения: 15.12.2021).

<sup>16</sup>Wendling Z. A., Emerson J. W., de Sherbinin A., Esty D. C., et al. Environmental Performance Index. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy, 2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://epi.yale.edu/downloads/epi2020technicalappendix20200604.pdf> (дата обращения: 15.12.2021).

<sup>17</sup>Country Profile – Belarus. Environmental Performance Index 2020 [Электронный ресурс]. URL: [https://epi.yale.edu/sites/default/files/files/BLR\\_EPI2020\\_CP.pdf](https://epi.yale.edu/sites/default/files/files/BLR_EPI2020_CP.pdf) (дата обращения: 15.12.2021).

<sup>18</sup>Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: [https://www.mnr.gov.ru/activity/directions/otsenka\\_kachestva\\_gorodskoy\\_sredy\\_prozhivaniya/](https://www.mnr.gov.ru/activity/directions/otsenka_kachestva_gorodskoy_sredy_prozhivaniya/) (дата обращения: 15.12.2021).

<sup>19</sup>Сайт общественной организации «Зеленый патруль» [Электронный ресурс]. URL: <https://greenpatrol.ru/ru> (дата обращения: 15.12.2021).

Как для городов, так и для районов показатели объединены в три категории, каждая из которых имеет свой относительный вес (процентный вклад) в итоговый рейтинг:

1. Текущее состояние и использование компонентов окружающей среды – 30 %.
2. Воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду – 30 %.
3. Управление воздействием на окружающую среду и эффективность экологической политики – 40 %.

Категория «Текущее состояние и использование компонентов окружающей среды» позволяет оценить экологическое состояние городов по текущему состоянию отдельных компонентов окружающей среды – водные ресурсы, атмосферный воздух, земельные ресурсы и биоразнообразие.

Категория «Воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду» позволяет провести комплексную оценку уровня воздействия на окружающую среду в пределах города производственной сферы, сельского хозяйства, жилищно-коммунального хозяйства, сферы обращения с отходами, энергетики и транспорта.

Категория «Управление воздействием на окружающую среду и эффективность экологической политики» позволяет комплексно оценить уровень реализации экологической политики на местном уровне, включая вопросы финансирования мероприятий по охране окружающей среды, вопросы экологического образования и просвещения, а также уровень вовлечения общественности в вопросы управления окружающей средой и распространения экологической информации.

Результат составления рейтинга экологического развития регионов получается путем суммирования частных результатов рейтинга по трем категориям с соответствующей весовой долей каждой категории в рейтинге.

Для формирования экологического рейтинга областных центров и г. Минска использован 31 показатель в 3-х категориях. При этом в каждой из 3-х категорий выделено от 3 до 5 групп показателей, и каждая группа включает от 1 до 4 показателей (табл. 1). В скобках указан относительный вес (вклад) каждой категории в итоговый балл рейтинга городов.

Таблица 1

**Критерии оценивания показателей и относительный вес (вклад) каждой категории в расчет экологического рейтинга областных центров и г. Минска**

Table 1

**Criteria for assessing indicators and the relative weight (contribution) of each category in the calculation of the environmental rating of regional centers and the city of Minsk**

Категория/группа показателей	Показатели	Единица измерения показателя
1. Текущее состояние и использование компонентов окружающей среды (30 %)		
1.1. Водные ресурсы, водопользование	Доля площади поверхностных водных объектов	%
	Удельное водопотребление на душу населения	л/сут на 1 чел
	Доля поверхностных водных объектов, соответствующих гигиеническим нормативам безопасности воды водных объектов культурно-бытового (рекреационного) водопользования.	%
1.2. Атмосферный воздух	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников	Тыс. т
	Удельный вес уловленных и обезвреженных загрязняющих веществ в общем количестве отходящих загрязняющих веществ	%
	Доля фактически выброшенных загрязняющих веществ к разрешенному выбросу в атмосферный воздух, установленному в разрешениях на выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух или комплексных природоохранных разрешениях	%
1.3. Земельные ресурсы и почвы	Суммарное содержание тяжелых металлов (свинца, цинка, кадмия, хрома, никеля, меди, ртути) и мышьяка в почвах города	Доля ПДК/ОДК
	Содержание нефтепродуктов в почвах города	Доля ПДК

Окончание табл. 1

Ending table 1

Категория/группа показателей	Показатели	Единица измерения показателя
2. Воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду (30 %)		
2.1. Производственная сфера	Сокращение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников после проведения мероприятий	%
	Доля повторно используемой и оборотной воды в общем объеме воды, используемой на производственные нужды	%
2.2. Транспорт	Наличие экологических транспортных средств в собственности физических лиц и организаций	Единица на 10000 чел.
2.3. Жилищно-коммунальное хозяйство	Образование твердых коммунальных отходов	Т/год на 10000 чел.
	Уровень использования твердых коммунальных отходов от объема их образования	%
	Обеспеченность мощностями по сортировке твердых коммунальных отходов на душу населения	Т/год на 10000 чел.
2.4. Обращение с отходами	Образование отходов производства	Т/год
	Уровень использования отходов производства от объема их образования	%
	Доля захороненных отходов производства и твердых коммунальных отходов на объектах захоронения от количества их образования	%
	Доля выведенного из эксплуатации оборудования, содержащего ПХБ	%
2.5. Энергетика	Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), установленная электрическая мощность	МВт
3. Управление воздействием на окружающую среду и эффективность экологической политики (40 %)		
3.1. Эколого-экономические показатели	Доля средств городского бюджета, направленных на охрану окружающей среды и реализацию природоохранных мероприятий	%
	Предприятия, имеющие сертифицированную систему менеджмента окружающей среды	Единица на 10000 чел.
3.2. Реализация местных природоохранных инициатив и участие в международном сотрудничестве	Наличие местных инициатив в области климата	Единица
	Количество проектов международной технической помощи, реализуемых на территории города	Единица на 10000 чел.
3.3. Участие общественности в решении экологических вопросов	Количество общественных экологов	Чел. на 10000 чел.
	Количество проведенных общественных обсуждений проектов экологически значимых решений, экологических докладов по стратегической экологической оценке, отчетов об оценке воздействия на окружающую среду	Единица на 10000 чел.
3.4. Экологическое образование и просвещение	Организация работы по экологическому образованию в учреждениях образования	Единица на 10000 чел.
	Количество проведенных экологических фестивалей, форумов, конференций	Единица на 10000 чел.
	Публикация актуальной информации о состоянии окружающей среды на территории города	единица
3.5 Эффективность использования городской территории	Обеспеченность населения озелененными территориями общего пользования	М <sup>2</sup> /чел.
	Обеспеченность населения зонами отдыха	%
	Доля промышленных и неиспользуемых городских территорий	%

Аналогичный подход использован и для формирования рейтинга экологического развития районов, объединивший 37 показателей в 3-х категориях. При этом для формирования рейтинга экологического

развития районов в каждой из 3-х категорий выделено от 4 до 6 групп показателей, и каждая группа включает от 1 до 4 показателей (табл. 2).

Таблица 2

**Критерии оценивания показателей и относительный вес (вклад) каждой категории в расчет экологического рейтинга районов**

Table 2

**Criteria for assessing indicators and the relative weight (contribution) of each category in the calculation of the environmental rating of regions**

Категория/группа показателей	Показатели	Единица измерения показателя
1. Текущее состояние и использование компонентов окружающей среды (30 %)		
1.1. Водные ресурсы, водопользование	Изменение площади поверхностных водных объектов	%
	Удельное водопотребление на душу населения	Л/сут на 1 чел
	Доля недостаточно очищенных сточных вод от сброса сточных вод в поверхностные водные объекты	%
1.2. Атмосферный воздух	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников	Тыс. т
	Удельный вес уловленных и обезвреженных загрязняющих веществ в общем количестве отходящих загрязняющих веществ	%
	Доля фактически выброшенных загрязняющих веществ к разрешенному выбросу в атмосферный воздух, установленному в разрешениях на выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух или комплексных природоохранных разрешениях	%
1.3. Земельные ресурсы и почвы	Доля средостабилизирующих видов земель	%
	Доля земель, подверженных различным видам деградации почв	%
	Средневзвешенный уровень гумуса в почвах пахотных земель	%
1.4. Биоразнообразие	Доля площади особо охраняемых природных территорий	%
	Площадь, на которой проведены работы по экологической реабилитации, восстановлению естественных экологических систем	Га
	Площадь произрастания инвазивных растений, которые оказывают вредное воздействие и (или) представляют угрозу биологическому разнообразию, жизни и здоровью граждан	Га
2. Воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду (30 %)		
2.1. Производственная сфера	Сокращение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников после проведения мероприятий	%
	Доля повторно используемой и оборотной воды в общем объеме воды, используемой на производственные нужды	%
2.2. Сельское хозяйство	Общая пестицидная нагрузка на почвы	Кг пестицидов на 1 га пашни
	Доля объектов хранения навоза и навозосодержащих сточных вод, не отвечающих экологическим требованиям	%
	Доля ликвидированных неиспользуемых артезианских скважин	%
2.3. Жилищно-коммунальное хозяйство	Образование твердых коммунальных отходов	Т/год на 10000 чел.
	Уровень использования твердых коммунальных отходов от объема их образования	%
	Обеспеченность мощностями по сортировке твердых коммунальных отходов на душу населения	Т/год на 10000 чел.
2.4. Обращение с отходами	Образование отходов производства	Т/год
	Уровень использования отходов производства от объема их образования	%
	Доля захороненных отходов производства и твердых коммунальных отходов на объектах захоронения от количества их образования	%
	Доля выведенного из эксплуатации оборудования, содержащего ПХБ	%

Окончание табл. 2

Ending table 2

Категория/группа показателей	Показатели	Единица измерения показателя
2.5. Энергетика	Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), установленная электрическая мощность	МВт
2.6. Транспорт	Наличие экологических транспортных средств в собственности физических лиц и организаций	Единица на 10000 чел.
3. Управление воздействием на окружающую среду и эффективность экологической политики (40 %)		
3.1. Эколого-экономические показатели	Инвестиции в основной капитал, направленные на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов	Руб. на чел.
	Доля средств местных бюджетов, направленных на охрану окружающей среды и реализацию природоохранных мероприятий	%
	Предприятия, имеющие сертифицированную систему менеджмента окружающей среды	Единица на 10000 чел.
3.2. Реализация местных природоохранных инициатив и участие в международном сотрудничестве	Наличие местных инициатив в области климата	Единица
	Количество проектов международной технической помощи, реализуемых на территории района	Единица на 10000 чел
3.3. Участие общественности в решении экологических вопросов	Количество общественных экологов	Чел. на 10000 чел.
	Количество проведенных общественных обсуждений проектов экологически значимых решений, экологических докладов по стратегической экологической оценке, отчетов об оценке воздействия на окружающую среду	единица на 10000 чел.
3.4. Экологическое образование и просвещение	Организация работы по экологическому образованию в учреждениях образования	Единица на 10000 чел.
	Количество проведенных экологических фестивалей, форумов, конференций	Единица на 10000 чел.
	Количество объектов экологического туризма	Единица на 10000 чел.
	Публикация актуальной информации о состоянии окружающей среды на территории района	Единица

Показатели рейтинга дают возможность измерять прогресс в изменении экологических показателей на уровне районов, областных центров и г. Минска во времени, а также сравнивать показатели в разрезе соответствующих территориальных единиц обобщения.

Исходными данными для расчета рейтинга экологического развития регионов являются данные, формируемые в соответствии с ТКП 17.02-19-2021 органами госуправления, предприятиями и организациями: Минприроды, включая территориальные органы и подчиненные организации, МЖКХ, Минсельхозпрод, Минздрав, МВД, Госстандарт, Госкомимущество, Белстат, НАН Беларуси, Брестский, Витебский, Гомельский, Гродненский, Минский и Могилевский горисполкомы.

Результатом составления рейтинга экологического развития регионов является ранжирование отдельно районов, отдельно областных центров и г. Минска.

Учитывая, что в Беларуси такой рейтинг вводится впервые, в 2021 г. РУП «ЦНИИКИВР» (разработчик методологии рейтинга экологического развития регионов) проведен расчет и составление экологического рейтинга за 2020 г. в разрезе областных центров и г. Минска.

Расчет рейтинга проводился в следующей последовательности:

- балльная оценка по группе показателей (с выведением баллов по каждой группе);
- балльная оценка по категории на основе баллов каждой группы показателей в пределах категории;
- итоговая балльная оценка на основе балльной оценки по каждой категории с учётом относительного веса каждой из категорий в рейтинге с определением места города в рейтинге (табл. 3).

Результаты расчета рейтинга экологического развития областных центров и г. Минска за 2020 г.

Table 3

The results of the calculation of the environmental development rating of regional centers and the city of Minsk for 2020

Город	Итого по категории 1 «Текущее состояние и использование компонентов окружающей среды»	Итого по категории 2 «Воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду»	Итого по категории 3 «Управление воздействием на окружающую среду и эффективность экологической политики»	Итоговые расчетные баллы рейтинга	Место в рейтинге
Гродно	178	232	399	283	1
Брест	270	368	205	273	2
Могилев	79	216	356	231	3
Минск	104	251	214	192	4
Гомель	264	250	83	187	5
Витебск	189	56	66	100	6

Примечание. Для визуализации балльной оценки в таблице также используется цветовая гамма: наиболее высокие баллы по показателю отражаются насыщенным зеленым цветом, переходящим в светло-зеленый и белый, с последующим переходом на светло-красный цвет и его насыщением до красного для показателей, имеющих наименьшее количество баллов.

По категории 1 «Текущее состояние и использование компонентов окружающей среды», отражающей состояние компонентов окружающей среды в пределах городов (водные ресурсы, атмосферный воздух, земельные ресурсы и почвы), в части водных ресурсов лидирующие позиции в 2020 г. занимали г. Витебск и г. Гомель, наименьшее количество баллов отмечено в г. Могилеве, в части состояния атмосферного воздуха, наилучший результат отмечен в г. Гомеле, наименьшее количество баллов набрал г. Могилев, в части состояния почв на территории городов, наилучший результат отмечен в г. Брест и г. Гродно, наименьшее количество баллов получил г. Витебск. Таким образом, результат рейтинга городов в категории «Текущее состояние и использование компонентов окружающей среды» указывает, что по совокупности рассмотренных показателей областные центры и г. Минск ранжированы в следующей последовательности (от лучшего к худшему): Брест, Гомель, Витебск, Гродно, Минск, Могилев.

По категории 2 «Воздействие основных видов экономической деятельности на окружающую среду», отражающей комплексную оценку уровня воздействия на окружающую среду городов основных видов экономической деятельности, объединенных в пять групп показателей (производственная сфера, транспорт, жилищно-коммунальное хозяйство, обращение с отходами и энергетика), областные центры и г. Минск ранжированы в следующей последовательности (от лучшего к худшему): Брест, Минск, Гомель, Гродно, Могилев, Витебск. При этом, для г. Витебска, по сравнению с другими городами, отмечено минимальное количество баллов по целому ряду рассматриваемых показателей: по объемам повторного и оборотного водоснабжения в общем объеме воды, используемой на производственные нужды, по развитию ВИЭ, по уровню использования твердых коммунальных отходов (ТКО) от объема их образования, по обеспеченности мощностями по сортировке ТКО на душу населения и др.

По категории 3 «Управление воздействием на окружающую среду и эффективность экологической политики», позволившей комплексно оценить уровень реализации экологической политики в городах по пяти группам показателей (эколого-экономические показатели; реализация местных природоохранных инициатив и участие в международном сотрудничестве; участие общественности в решении экологических вопросов; экологическое образование и просвещение; эффективное использование городской территории), города ранжированы следующим образом (от лучшего к худшему): Гродно, Могилев, Минск, Брест, Гомель, Витебск. При этом наиболее проблемная ситуация для ряда городов наблюдается по группе показателей «экологическое образование и просвещение», ориентированных на реализацию практических действий по экологическому образованию в учреждениях образования, на популяризацию экологического просвещения в виде проведенных на территории города экологических фестивалей, форумов и конференций, а также на вопросы информационного обеспечения населения города актуальной информацией о состоянии окружающей среды города. Наилучший результат в 2020 г. по этой группе показателей отмечен в Могилеве, наихудший – в Витебске.

Таким образом, по результатам расчета рейтинга экологического развития областных центров и г. Минска за 2020 г. места в рейтинге распределились следующим образом: Гродно, Брест, Могилев, Минск, Гомель и Витебск.

Проведенная работа по расчету и формированию рейтинга экологического развития областных центров и г. Минска за 2020 г. показала возникшие проблемы в части эффективности реализации экологической политики на региональном уровне.

По результатам составления рейтинга экологического развития областных центров и г. Минска определены наиболее значимые экологические проблемы для последующего планирования, разработки и реализации мероприятий по улучшению экологического состояния городов и их устойчивому функционированию.

Таким образом, формирование рейтинга экологического развития регионов включает два направления:

- научно-методическое обеспечение функционирования рейтинга;
- практическое обеспечение функционирования рейтинга.

Научно-методическое обеспечение функционирования и развития рейтинга будет осуществлять Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь по следующим направлениям:

- координация работ по формированию и уточнению перечня показателей и методик их формирования, используемых для расчета (формирования) рейтинга;

- координация работ по формированию и уточнению целевых значений показателей, используемых для расчета (формирования) рейтинга;

- установление формы и сроков передачи данных от иных органов государственного управления и организаций, подчиненных Правительству Республики Беларусь, местных органов власти (райисполкомы, Брестский, Витебский, Гомельский, Гродненский, Минский и Могилевский горисполкомы), территориальных органов Минприроды и подчиненных организаций, иных организаций Республики Беларусь, являющихся держателями (производителями) данных;

- определение формы и способов распространения результатов рейтинга.

Практическое обеспечение функционирования рейтинга также будет осуществляться Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь по следующим направлениям:

- организация работы по проведению рейтинга и распространению его результатов;

- запрос данных у иных органов государственного управления и организаций, подчиненных Правительству Республики Беларусь, местных органов власти (райисполкомы, Брестский, Витебский, Гомельский, Гродненский, Минский и Могилевский горисполкомы), территориальных органов Минприроды и подчиненных организаций, иных организаций Республики Беларусь, являющихся держателями (производителями) данных;

- внесение полученных данных в базу данных и их анализ;

- проведение расчета (формирование) показателей рейтинга, анализ и интерпретация полученных результатов;

- обеспечение распространения (публикации) данных рейтинга.

Анализ результатов расчета рейтинга экологического развития областных центров и г. Минска приведен в экологическом бюллетене «Состояние природной среды Беларуси» за 2020 г.

Таким образом, рейтинг экологического развития регионов содержит оценку экологической обстановки на уровне региона с тенденциями ее изменения и служит информационной основой для принятия экологически значимых решений по совершенствованию экологической политики, механизмов регулирования природопользования и охраны окружающей среды, контроля за соблюдением природоохранного законодательства, оценку эффективности принимаемых мер по охране окружающей среды, разработки и реализации региональных программ и планов действий, а также научно-технических разработок, направленных на обеспечение экологической безопасности и устойчивого природопользования.

В 2021 г. РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов» на основании разработанной методики создал информационный ресурс «Рейтинг экологического развития регионов Республики Беларусь», позволяющий автоматизировать процедуру расчета рейтинга экологического развития регионов Беларуси с возможностью отображения результатов рейтинга в картографическом, графическом и табличном видах.

Поскольку результаты ежегодного формирования экологического рейтинга, исходя из методологии его составления, будут являться элементом информации об экологической ситуации в Республике Беларусь, требуется дальнейшее формирование и развитие национального законодательства в данной области.

## Заключение

Рейтинг экологического развития регионов (районов, областных центров и г. Минска) Республики Беларусь складывается из совокупности показателей, принятых и используемых республикой для реализации норм и принципов устойчивого развития, характеризующих текущее состояние окружающей среды на региональном уровне, антропогенную нагрузку на окружающую среду на уровне регионов

и эффективность реализуемых мероприятий в области охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов.

Рейтинг экологического развития регионов позволяет выполнить оценку экологической обстановки на уровне района, областных центров и г. Минска и может служить информационной основой для принятия экологически значимых решений по совершенствованию экологической политики, механизмов регулирования природопользования и охраны окружающей среды, контроля за соблюдением природоохранного законодательства, оценки эффективности принимаемых мер по охране окружающей среды, разработки и реализации региональных программ и планов действий, а также научно-технических разработок, направленных на обеспечение экологической безопасности и устойчивого природопользования.

В 2021 г. на основе разработанной методологии РУП «ЦНИИКИВР» проведен расчет и составление экологического рейтинга за 2020 г. в разрезе областных центров и г. Минска, по результатам которого города в рейтинге распределились следующим образом: Гродно, Брест, Могилев, Минск, Гомель и Витебск. По результатам анализа рейтинга экологического развития областных центров и г. Минска определены наиболее значимые экологические проблемы для последующего планирования, разработки и реализации мероприятий по улучшению экологического состояния территорий городов и их устойчивому функционированию.

### Библиографические ссылки

1. Towards a Shared Environmental Information System (SEIS), Commission of the European communities, Brussels, 01.02.2008. [Internet; cited 2021 December 15]. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0046:FIN:EN:PDF>.
2. Показатели мониторинга прогресса в достижении Целей в области развития, сформулированных в Декларации тысячелетия. Нью-Йорк: ООН; 2006. 112 с.
3. Дубенок СА, Кулаков АЮ. Имплементация показателей целей устойчивого развития, связанных с водой. Опыт Республики Беларусь. Минск: Четыре четверти; 2020. 126 с.
4. Environmental Performance Index Technical Appendix, 2016, 76 с. [Internet; cited 2021 December 15]. Available from: <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/epi-environmental-performance-index-2016/data-download> (дата обращения: 15.12.2021).

### References

1. Towards a Shared Environmental Information System (SEIS), Commission of the European communities, Brussels, 01.02.2008. [Internet; cited 2021 December 15]. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0046:FIN:EN:PDF>.
2. *Pokazатели monitoringa progressa v dostizhenii Tseley v oblasti razvitiya, sformulirovannykh v Deklaratsii tysyacheletiya* [Indicators for monitoring progress towards the achievement of the Millennium Development Goals]. New York: UN; 2006. 112 p. Russian.
3. Dubianok SA, Kulakou AJu. *Implementatsiya pokazateley tseley ustoychivogo razvitiya, svyazannykh s vodoy. Opyt Respubliki Belarus* [Implementation of water-related sustainable development goals indicators: experience of the Republic of Belarus]. Minsk: Chetyre chetverti; 2020. 126 p. Russian.
4. Environmental Performance Index Technical Appendix, 2016, 76 с. [Internet; cited 2021 December 15]. Available from: <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/epi-environmental-performance-index-2016/data-download>.

Статья поступила в редколлегию 24.12.2021.  
Received by editorial board 24.12.2021.

---

---

# ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

---

## THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

---

---

УДК 577:632.938

### НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САЛИЦИЛАТОВ В АДАПТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ

Л. В. ПАШКЕВИЧ<sup>1)</sup>, Л. Ф. КАБАШНИКОВА<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь

В исследовании научно обосновано применение экзогенного растительного метаболита – салициловой кислоты (СК) в качестве индуктора системной приобретенной устойчивости растений ярового ячменя. В условиях фитотронно-тепличного эксперимента выявлено положительное действие защитно-стимулирующего состава на основе салицилата на параметры роста и развития растений ярового ячменя, инфицированных грибом *Bipolaris sorokiniana*, и степень их пораженности темно-бурой пятнистостью. В полевых условиях показано стимулирующее влияние СК и фенолсалицилата на ростовые процессы, содержание фотосинтетических пигментов в листе, активность перекисного окисления липидов и пероксидазы в растительных клетках. Установлено повышение общей устойчивости растений ярового ячменя в посевах к неблагоприятным факторам внешней среды, включая фитопатогены, что в итоге обеспечило формирование урожая на уровне стандартного фунгицида Адексар с прибавкой в 4–5 ц/га по сравнению с необработанным контролем. На основе полученных результатов разработан иммуномодулирующий препарат «Иммунакт-СК», представляющий собой композицию СК и водорастворимого полимера ВРП-3. Применение препарата обеспечивает

---

#### Образец цитирования:

Пашкевич ЛВ, Кабашникова ЛФ. Научные основы использования салицилатов в адаптивных технологиях возделывания ярового ячменя. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;1:25–36.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-25-36>

#### For citation:

Pashkevich LV, Kabashnikova LF. Scientific basis of the use of salicylates in adaptive technologies of spring barley cultivation. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;1:25–36. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-25-36>

---

#### Авторы:

Любовь Валерьевна Пашкевич – научный сотрудник.  
Людмила Фёдоровна Кабашникова – доктор биологических наук, доцент; член-корреспондент НАН Беларуси; заведующий лабораторией.

#### Authors:

*Lyubov V. Pashkevich*, researcher.  
[Ljubi.k87@gmail.com](mailto:Ljubi.k87@gmail.com)  
*Liudmila F. Kabashnikova*, doctor of science (biology), docent; corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus; head of the laboratory.  
[kabashnikova@mail.ru](mailto:kabashnikova@mail.ru)

получение стабильных урожаев зерна ярового ячменя на уровне стандартных химических фунгицидов, что в перспективе позволит значительно сократить применение дорогостоящих химических препаратов для защиты растений и снизить химическую нагрузку на окружающую среду.

**Ключевые слова:** салициловая кислота; индукторы иммунитета; яровой ячмень; темно-бурая пятнистость; фотосинтетические пигменты; окислительный статус; устойчивость; урожайность.

## SCIENTIFIC BASIS OF THE USE OF SALICYLATES IN ADAPTIVE TECHNOLOGIES OF SPRING BARLEY CULTIVATION

L. V. PASHKEVICH<sup>a</sup>, L. F. KABASHNIKOVA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Biophysics and Cell Engineering, National Academy of Sciences of Belarus,  
27 Academičnaja Street, Minsk 220027, Belarus*

*Corresponding author: L. F. Kabashnikova (kabashnikova@mail.ru)*

The article scientifically substantiates the use of an exogenous plant metabolite, salicylic acid (SA), as an inducer of nonspecific acquired resistance in spring barley plants. Under a greenhouse experiment, a positive effect of a protective and stimulating composition based on salicylate on the parameters of growth and development of spring barley plants infected with the fungus *B. sorokiniana*, and the degree of their infection with a fungal disease – dark brown spotting, was revealed. Under field conditions, the stimulating effect of SA and phenyl salicylate on growth processes, the content of photosynthetic pigments in the leaf, the activity of lipid peroxidation and peroxidase in plant cells was shown. An increase in the overall resistance of spring barley plants in crops to unfavorable environmental factors, including phytopathogens, was established, which ultimately ensured the formation of a crop at the level of the standard fungicide Adexar with an increase of 4–5 centners for hectare compared to the untreated control. On the basis of the results obtained, the immunomodulatory drug “Immunakt-SA” was developed, which is a composition of SA and a water-soluble polymer VSP-3. The use of the drug ensures stable yields of barley grain at the level of standard chemical fungicides, which in the future will significantly reduce the use of expensive chemicals for plant protection and the chemical load on the environment.

**Keywords:** salicylic acid; immunity inducers; spring barley; dark brown spotting; photosynthetic pigments; oxidative status; stability; yield.

### Введение

В последнее время во всем мире уделяется большое внимание проблемам загрязнения окружающей среды и безопасности пищевых продуктов, возникающим в результате чрезмерного или ненадлежащего использования химических пестицидов [1]. Одновременно растет интерес к экологически безопасным агротехнологиям и биологически обоснованным методам борьбы с болезнями сельскохозяйственных культур. На сегодняшний день наиболее перспективным и быстро развивающимся направлением в защите растений от заболеваний является повышение их системной устойчивости с помощью определенных химических соединений биогенного происхождения [2]. Стратегии, повышающие собственный иммунитет растений и способствующие их здоровому росту и развитию, имеют большой потенциал для предотвращения заражения и болезней, обеспечивая при этом снижение объемов использования химических средств защиты в агропроизводстве [3].

Индукторы иммунитета представляют собой класс иммуоактивных соединений, которые могут вызывать системную приобретенную устойчивость у растений. В последнее десятилетие в ряде стран развернуты работы по созданию индукторов устойчивости растений на основе метаболитов иммунного ответа, элиситоров или авирулентных штаммов фитопатогенов [2; 3]. Биологически активные препараты имеют важное преимущество перед химическими фунгицидами: они не токсичны, не вызывают привыкания у возбудителей болезней, не оказывают губительного влияния на экологические системы и безопасны для человека и животных [3].

Известно, что растения, обработанные индуцирующими агентами, активируют множественные защитные ответы, которые выражаются в формировании химических и физических барьеров на пути проникновения и развития патогена. Обычно индукторы стимулируют возбуждающие сигналы, которые поступают в геном и активируют защитные гены растений, что приводит к включению каскада защитных реакций и, в конечном счете, к индуцированной системной устойчивости [3].

Салициловая кислота (СК) является одним из веществ, которые в последние годы привлекают пристальное внимание исследователей в связи с их способностью индуцировать системную приобретенную

устойчивость растений к разнообразным возбудителям болезней [4]. СК – это природное химическое вещество фенольной природы, содержащееся в растениях. Название происходит от латинского слова «salix» («ива»), из коры которой она была впервые выделена. СК является наиболее изученным индуктором, который используется для повышения устойчивости растений к фитопатогенам. Она играет важнейшую роль в регуляции физиологических и биохимических процессов на протяжении всей жизни растения: участвует в регуляции роста и развития, фотосинтеза, транспирации, поглощения и переноса ионов, а также в эндогенной передаче сигналов, индуцируя продукцию белков, связанных с патогенезом и опосредуя защиту растений при патогенезе [5]. В 1979 г. Р. Вайт [6] отметил, что при формировании неспецифического адаптационного синдрома в клетках растения многократно увеличивается содержание СК, а обработка растений этим веществом активирует экспрессию защитных PR-генов (pathogenesis related gene) как минимум 9 классов и индуцирует развитие системной приобретенной устойчивости (SAR) [6; 7]. С помощью трансгенных (салицилат-дефицитных) растений табака было показано, что обработка таких растений СК или ее структурными аналогами (метил-2,6-дихлоризоникотиновой кислотой и бензотиодиазолом) приводит к запуску устойчивости, сравнимой с уровнем контрольных растений [8]. Таким образом, ключевая роль СК как индуктора устойчивости растений в настоящее время не вызывает сомнений [9]. Важным достоинством применения как СК, так и других индукторов устойчивости является многофакторность их действия, обусловленная широким спектром активности в отношении различных растений и патогенов, других стресс-факторов среды, а также низкой стоимостью [10].

Темно-бурая пятнистость ячменя, вызываемая гемибитрофным грибом *Bipolaris sorokiniana* из класса Deuteromycetes, распространена повсеместно и является наиболее вредоносной инфекцией для этой культуры [11]. Ежегодное поражение посевов возбудителем темно-бурой пятнистости приводит к регулярному снижению урожая зерна [12]. Основной задачей для решения проблемы повышения устойчивости растений, является выяснение молекулярных, эпидемиологических и экологических механизмов, лежащих в основе взаимодействия растений и патогенов и разработка на их основе эффективных и долгосрочных программ предотвращения и сокращения наиболее опасных заболеваний культурных растений.

При этом, несмотря на постоянно возрастающий интерес к природным веществам, повышающим устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды, в Беларуси практически не разрабатываются иммуномодулирующие препараты, предназначенные для повышения болезнеустойчивости сельскохозяйственных культур, что делает актуальным исследование эффективности применения таких препаратов в сельскохозяйственной практике.

Цель данной работы – исследование механизмов действия экзогенного салицилата и его производного – фенолсалицилата (ФСК) на растения ярового ячменя при инфицировании грибом *Bipolaris sorokiniana* в контролируемых условиях фитотрона и в посевах, научное обоснование использования эффективных защитных препаратов нового поколения, предохраняющих растения от комплекса неблагоприятных факторов внешней среды, включая патогены.

## Материалы и методы исследования

Вегетационный опыт проводился в фитотронно-тепличном комплексе (ФТК) РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию». В процессе проведения опыта в ФТК автоматически поддерживались следующие параметры искусственного климата: фотопериод – 16/8 ч (день/ночь); температура днем 22–25 °С, ночью 18 °С; освещенность на уровне верхушек растений 17–20 тыс. люкс, относительная влажность воздуха 60–70 %. В вегетационные сосуды емкостью 10 л высевали по 20 семян ярового ячменя сорта Магутны в четырехкратной повторности. В 16-дневном возрасте проростки опрыскивали раствором СК ( $10^{-4}$  М). Инфицирование растений в 20-дневном возрасте проводили путем нанесения на поверхность листьев суспензии вирулентных спор *Bipolaris sorokiniana*. Заражение проводили в фазу кущения споровой суспензией возбудителя с концентрацией  $10^6$  спор/мл. Расход суспензии 50 мл/сосуд. С целью создания условий влажной камеры после опрыскивания споровой суспензией каждый сосуд помещали в полиэтиленовый пакет емкостью 30 л в течение 24 ч. Учеты поражения проводили в фазы «выхода в трубку» (ВВСН 30–32) и «молочно-восковой спелости» (ВВСН 73). В качестве контроля использовали неинфицированные растения, выращенные в условиях, исключавших заражение.

Полевые исследования проводились на экспериментальной базе РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию» в 2013–2015 гг. по методике Доспехова [13]. Были изучены 3 варианта обработок вегетирующих растений в четырехкратной повторности. Общая площадь опытного участка составляла 96 м<sup>2</sup>, учетная площадь делянки – 8 м<sup>2</sup>. Технология возделывания ярового ячменя соответствовала принятым отраслевым регламентам. Обработку растений ярового ячменя по вегетации проводили в фазе выхода в трубку (ВВСН 37). Защитно-стимулирующий состав (ЗСС) представлял собой композицию СК

или ФСК с водорастворимым полимером (ВРП-3). В рабочий раствор вносили ЗСС из расчета 2,0 л/га, доза внесения рабочего раствора составляла 200 л/га. Анализ структурно-функционального состояния растений ячменя осуществлялся в фазах колошения (ВВСН 51) и молочно-восковой спелости (ВВСН 73).

Эффективность обработки растений ярового ячменя салицилатами оценивалась по показателям морфоструктуры растений, содержанию фотосинтетических пигментов, параметрам окислительного статуса и урожайности ярового ячменя.

Параметры морфоструктуры растений ячменя (высота и масса растения, количество и масса стеблей, масса листьев, количество и масса колосьев) оценивали согласно методике Зеленского [14].

Активность перекисного окисления липидов (ПОЛ) оценивали по количеству малонового диальдегида (МДА), которое определяли по цветной реакции с тиобарбитуровой кислотой (ТБК) с последующим измерением оптической плотности раствора при  $\lambda=532$  нм на спектрофотометре *Shimadzu UV-2401PC* (Shimadzu, Япония) [15]. Для этого 300 мг растительного материала растирали до гомогената при температуре жидкого азота в 10 мл фосфатного буфера 0,005 М (рН 7,2–7,4). Затем к 3 мл гомогената добавляли 3 мл 0,5 % ТБК в 20 % трихлоруксусной кислоте, выдерживали 20 мин на кипящей водяной бане и центрифугировали в течение 10 мин при 5000–7000 оборотах/мин. Количество МДА определяли на спектрофотометре *Shimadzu-UV 2401 PC* (Япония) при длине волны  $\lambda=532$  нм с поправкой на неспецифическое поглощение при 600 нм, используя молярный коэффициент  $1,55 \times 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ .

Функциональную активность пероксидазы измеряли спектрофотометрически по кинетике реакции окисления бензида пероксидазой в присутствии пероксида водорода [16]. Навеску листьев (50 мг) растирали в 10 мл 0,2 М ацетатного буфера (рН 5,4) и затем фильтровали. Полученный фильтрат центрифугировали 10 мин при 7000 об/мин. К 5 мл супернатанта добавляли 5 мл ацетатного буфера и 5 мл 0,05 М бензида. Оставшийся супернатант (по 1 мл) использовали для определения количества белка. Реакцию инициировали добавлением 50 мкл 1 % водного раствора пероксида водорода. В контрольную кювету наливали 2 мл раствора, содержащего супернатант, ацетатный буфер и бензидин, и 50 мкл воды, в опытную – 2 мл того же раствора и 50 мкл 1 % пероксида водорода. Измерение кинетики реакции окисления проводили на спектрофотометре *Shimadzu-UV 2401 PC* (Shimadzu, Япония) ежесекундно при  $\lambda=605$  нм в течение 300 с.

Определение содержания пероксида водорода в экстрактах листьев проводили с помощью флуоресцентного метода, в основе которого лежит реакция окисления скополетина в присутствии  $\text{H}_2\text{O}_2$ , катализируемая пероксидазой хрена [17]. Навески листьев по 0,3 г растирали в фарфоровой ступке в жидком азоте до порошка. Затем приливали 1 мл 0,2н  $\text{HClO}_4$  и растирали до гомогената. Гомогенат переносили в центрифужные пробирки, смывая ступку еще 1 мл 0,2н  $\text{HClO}_4$ . Гомогенат центрифугировали в течение 5 мин при 13000 g на центрифуге К-24 (Германия). Для нейтрализации рН к 500 мкл супернатанта добавляли 37–38 мкл 4М КОН (конечное значение рН составляло 7,5–8,0) и центрифугировали 5 мин при 13000 g на центрифуге для эпидорфов *Bekman culter Microfuge 16*. Для определения количества пероксида водорода к 930 мкл 0,1М Трис-НСI буфера рН 7,0, последовательно добавляли 10 мкл раствора пероксидазы хрена (200 ед. на 1 мл) и 10 мкл 0,1 мМ раствора скополетина. Реакцию запускали добавлением 50 мкл супернатанта. Контролем служила проба, состоящая из 950 мкл 0,1М Трис-НСI буфера и 50 мкл супернатанта. Вторым контролем служила проба, состоящая из 980 мкл 0,1М Трис-НСI буфера, 10 мкл раствора пероксидазы хрена (2500 ед. на 1 мл) и 10 мкл 0,1 мМ раствора скополетина. Определение содержания  $\text{H}_2\text{O}_2$  проводили, регистрируя флуоресценцию скополетина ( $\lambda_{\text{воз}}=370$  нм,  $\lambda_{\text{рег}}=464$  нм) на спектрофлуориметре *Solar CM 2206* (Беларусь). Содержание пероксида водорода рассчитывали в относительных единицах по снижению интенсивности флуоресценции скополетина.

Содержание фотосинтетических пигментов определяли в ацетоновых экстрактах на спектрофотометре *Shimadzu UV-2401PC* (Shimadzu, Япония). Для экстракции пигментов использовали высечки размером 1 см из верхней трети листа. Экстракцию хлорофиллов (Хл) и каротиноидов производили 99,5%-ным ацетоном [18] в 3-кратной повторности. Содержание пигментов рассчитывали по формулам:

$$C_a = 9,784 \times E662 - 0,99 \times E644,$$

$$C_b = 21,426 \times E644 - 4,65 \times E662,$$

$$C_{\text{car}} = 4,695 \times E440,5 - 0,268 \times (C_a + C_b),$$

где  $C_a$  – концентрация Хл а, мкг/мл;

$C_b$  – концентрация Хл b, мкг/мл;

$C_{\text{car}}$  – концентрация каротиноидов, мкг/мл;

E – экстинция при соответствующей длине волны.

Содержание фотосинтетических пигментов рассчитывали в мг на г сырой массы листьев.

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с помощью программ *Excel 2013*, ANOVA. Все эксперименты проводили в 3 биологических и в 3 аналитических повторностях. Оценивали среднюю стандартную ошибку среднего. Статистический анализ проводили с использованием *t*-критерия Стьюдента. Различия считали статистически достоверными при уровне значимости  $p \leq 0,05$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

В условиях фитотрона установлено, что обработка растений ячменя СК в концентрации  $10^{-4}$  М в фазу кущения способствовала повышению их устойчивости к заражению грибом *B. sorokiniana*. Процент пораженности листовой поверхности в фазу молочно-восковой спелости в варианте с обработкой СК не превысил 20 %, в то время как в контроле составил 40–50 % и более.

Анализ структурно-функционального состояния растений после инфицирования фитопатогенным грибом *B. sorokiniana* показал, что инокуляция спорами патогена приводит к ингибированию ростовых процессов: снижению сырой биомассы (на 38 % в фазе выхода в трубку и на 63 % – в фазе колошения), а также высоты растений в фазе колошения на 24 % по сравнению с контролем (табл. 1, 2).

Таблица 1

Влияние СК на сырую биомассу растений ячменя в условиях инфицирования патогенным грибом *Bipolaris sorokiniana*

Table 1

The effect of SA on the wet weight of barley plants under conditions of infection with the pathogenic fungus *Bipolaris sorokiniana*

Вариант	Масса растения, г	
	выход в трубку (17 дней после инфицирования)	колошение (35 дней после инфицирования)
Контроль	1,91 ± 0,30	6,92 ± 1,27
Салициловая кислота (СК)	1,72 ± 0,31	7,81 ± 1,56
<i>B. sorokiniana</i> ( <i>B. S.</i> )	1,19 ± 0,22*	2,55 ± 0,79*
СК+ <i>B. S.</i>	1,52 ± 0,32	4,98 ± 0,81

\*Различия по сравнению с контролем достоверны при  $p \leq 0,05$ .

Таблица 2

Влияние СК на высоту растений ячменя в условиях инфицирования патогенным грибом *Bipolaris sorokiniana*

Table 2

The effect of SA on the height of barley plants under conditions of infection with the pathogenic fungus *Bipolaris sorokiniana*

Вариант	Высота растения, см	
	выход в трубку (17 дней после инфицирования)	колошение (35 дней после инфицирования)
Контроль	42,56 ± 2,01	89,7 ± 4,24
Салициловая кислота (СК)	39,9 ± 3,67	86,6 ± 8,18
<i>B. sorokiniana</i> ( <i>B. S.</i> )	39,3 ± 2,91	68,2 ± 8,52*
СК+ <i>B. S.</i>	43,2 ± 4,05	77,2 ± 4,37

\*Различия по сравнению с контролем достоверны при  $p \leq 0,05$ .

Обработка растений ячменя СК предотвращала ингибирующее действие патогена на массу и высоту растений ячменя (см. табл. 1, 2). Под влиянием СК снижение массы инфицированного растения составило 20 % в фазе выхода в трубку в сравнении с контролем, что оказалось на 18 % меньше, чем без применения фитогормона. Ростовые показатели инфицированных растений под влиянием СК достигли контрольных значений.

Известно, что активность фотосинтетического аппарата (ФСА) играет важнейшую роль в защите растений от действия стрессоров. В наших экспериментах наблюдалось негативное действие патогенного гриба на процессы биосинтеза фотосинтетических пигментов в онтогенезе растений, о чем свидетельствует снижение содержания хлорофилловых пигментов и каротиноидов в конце вегетации (табл. 3, 4). Обработка салицилатом предотвращала вызванное патогенной инфекцией снижение содержания фотосинтетических пигментов, повышая их количество в тканях листа на 6–27 % в зависимости от стадии развития растений.

Таблица 3

Влияние СК на содержание хлорофилловых пигментов в растениях ячменя, инфицированных патогенным грибом *Bipolaris sorokiniana*

Table 3

The effect of SA on the content of chlorophyll pigments in the barley plants infected with the pathogenic fungus *Bipolaris sorokiniana*

Вариант	Содержание хлорофилловых пигментов, мг/г сырой массы и в сравнении с контролем				
	выход в трубку ВВСН 37	начало колошения ВВСН 51	конец цветения ВВСН 69	начало молочной спелости ВВСН 71	молочная спелость ВВСН 74
К	1,378 ± 0,009	1,721 ± 0,009	1,15 ± 0,028	1,13 ± 0,056	3,27 ± 0,099
СК	1,463 ± 0,039 (1,06)	1,559 ± 0,012 (0,91)	1,194 ± 0,087 (1,04)	1,313 ± 0,41 (1,16)	3,089 ± 0,136 (0,94)
<i>B. S.</i>	1,324 ± 0,007 (0,96)	1,664 ± 0,016 (0,97)	1,282 ± 0,088 (1,11)	1,256 ± 0,074 (1,11)	2,693 ± 0,878 (0,82)*
<i>B. S.</i> + СК	1,527 ± 0,004 (1,11)	1,867 ± 0,006 (1,08)	1,223 ± 0,079 (1,06)	1,393 ± 0,025 (1,23)*	4,100 ± 0,661 (1,25)*

К – контроль, СК – салициловая кислота, *B. S.* – *Bipolaris sorokiniana*.

Примечание. \*Различия по сравнению с контролем достоверны при  $p \leq 0,05$ .

Таблица 4

Влияние экзогенной СК на содержание каротиноидов в растениях ячменя, инфицированных *Bipolaris sorokiniana*

Table 4

Effect of exogenous SA on the content of carotenoids in barley plants infected with *Bipolaris sorokiniana*

Вариант	Содержание каротиноидов, мг/г сырой массы и в сравнении с контролем				
	выход в трубку ВВСН 37	начало колошения ВВСН 51	конец цветения ВВСН 69	начало молочной спелости ВВСН 71	молочная спелость ВВСН 74
К	0,301 ± 0,003	0,373 ± 0,006	0,256 ± 0,006	0,246 ± 0,001	0,672 ± 0,004
К + СК	0,325 ± 0,001 (1,07)*	0,331 ± 0,001 (0,89)*	0,261 ± 0,002 (1,02)	0,289 ± 0,003 (1,17)*	0,637 ± 0,004 (0,95)
<i>B. S.</i>	0,305 ± 0,002 (1,01)	0,350 ± 0,008 (0,94)*	0,291 ± 0,001 (1,14)*	0,282 ± 0,009 (1,15)*	0,546 ± 0,017 (0,81)*
<i>B. S.</i> + СК	0,350 ± 0,008 (1,16)*	0,399 ± 0,003 (1,07)*	0,268 ± 0,006 (1,05)	0,312 ± 0,008 (1,27)*	0,837 ± 0,015 (1,25)*

К – контроль, СК – салициловая кислота, *B. S.* – *Bipolaris sorokiniana*.

Примечание. \*Различия по сравнению с контролем достоверны при  $p \leq 0,05$ .

Таблица 5

Влияние экзогенной СК на содержание пероксида водорода в растениях ячменя, инфицированных *Bipolaris sorokiniana*

Table 5

Effect of exogenous SA on the content of hydrogen peroxide in barley plants infected with *Bipolaris sorokiniana*

Вариант	Содержание H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , отн.ед.	
	выход в трубку (17 дней после инфицирования)	колошение (35 дней после инфицирования)
Контроль	2,59 ± 0,23	4,02 ± 0,07
СК	3,58 ± 0,08*	4,02 ± 0,12
<i>B. sorokiniana</i> ( <i>B. S.</i> )	3,77 ± 0,18*	3,24 ± 0,16*
СК + <i>B. S.</i>	3,63 ± 0,19*	3,54 ± 0,23

\*Различия по сравнению с контролем достоверны при  $p < 0,05$ .

Положительное действие экзогенного салицилата в условиях патогенного инфицирования растений ячменя на самых поздних этапах онтогенеза проявилось в повышении до контрольного значения массы колоса, сниженной на 20 % в результате поражения грибным патогеном, а также увеличением выхода соломы на 36 % относительно контроля (рис. 1).

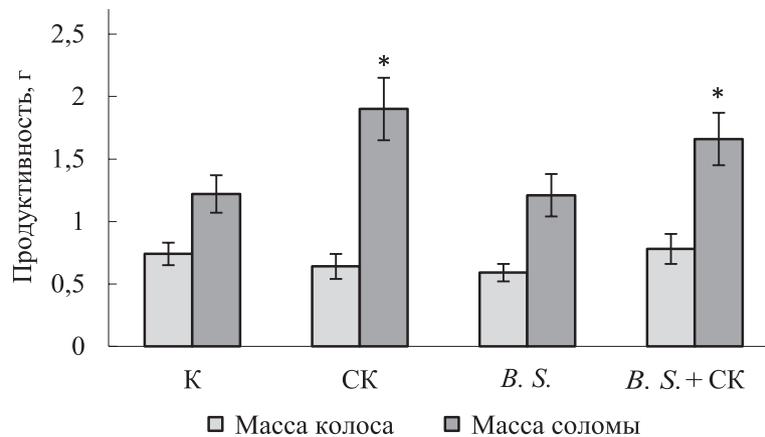


Рис. 1. Влияние СК и инфицирования патогенным грибом *Bipolaris sorokiniana* на продуктивность растений ячменя: К – контроль, СК – салициловая кислота, B. S. – *Bipolaris sorokiniana*, B. S. + СК – *Bipolaris sorokiniana* и салициловая кислота. \*Различия достоверны по отношению к контролю при  $p \leq 0,05$

Fig. 1. The effect of SA and infection with the pathogenic fungus *Bipolaris sorokiniana* on the productivity of barley plants: К – control, СК – salicylic acid; B. S. – *Bipolaris sorokiniana*, B. S. + СК – *Bipolaris sorokiniana* and salicylic acid. \*Differences are significant in relation to control at  $p \leq 0.05$

Таким образом, полученные результаты указывают на праймирующее действие экзогенной СК ( $10^{-4}$  М) на защитную систему растений ячменя, что проявляется в снижении степени поражения листьев инфекцией *Bipolaris sorokiniana*, улучшении морфометрических и фотосинтетических показателей на фоне заражения, генерации сигнальной молекулы – пероксида водорода, а также в увеличении продуктивности растений ячменя.

В условиях полевого опыта обработка растений ячменя в фазе выхода в трубку ЗСС на основе салицилата или его производного ФСК оказывала выраженный ростостимулирующий эффект (рис. 2). Растения, обработанные ЗСС, отличались большей массой как побегов (на 28–37 %), так и листьев (на 21–27 %), а также высокой степенью кустистости в фазе колошения в сравнении с контрольными образцами.

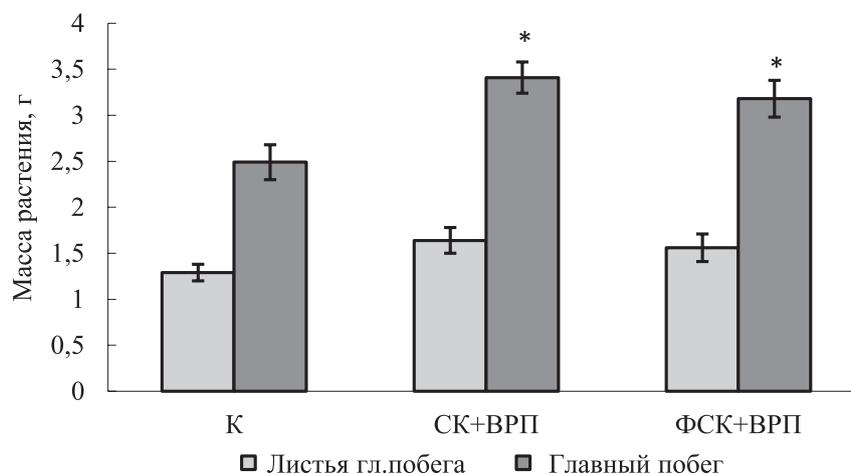


Рис. 2. Влияние салицилатов на массу растений ячменя (стадия колошения): К – контроль, СК – салициловая кислота, ФСК – фенолсалициловая кислота, ВРП – водорастворимый полимер. \*Различия достоверны по отношению к контролю при  $p \leq 0,05$

Fig. 2. The effect of salicylates on the mass of barley plants (earring stage): К – control, СК – salicylic acid; ФСК – phenylsalicylic acid; ВРП – water solvent polymer. \*Differences are significant in relation to control at  $p \leq 0.05$

В фазе молочно-восковой спелости содержание Хл (a + b) во подфлаговых листьях ячменя в результате применения ЗСС на основе СК повысилось на 66 %, а после применения ФСК – на 18 % относительно

контроля (рис. 3). Содержание каротиноидов в этой фазе также возрастало у СК- и ФСК-обработанных растений ячменя (на 67 и 21 % соответственно).

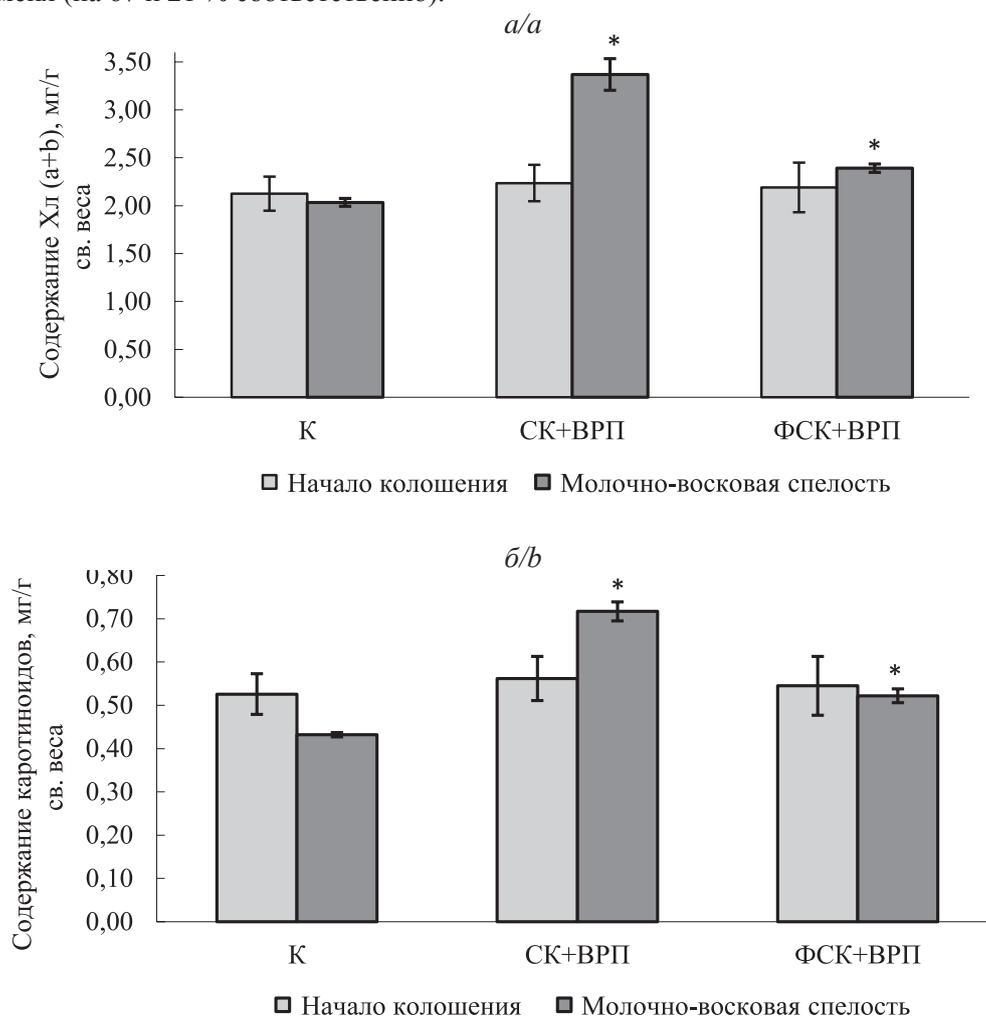


Рис. 3. Влияние салицилатов на содержание Хл (a+b) (a) и каротиноидов (б) в листьях ячменя в пересчете на единицу сырой массы на стадиях колошения и молочной спелости:

К – контроль, СК – салициловая кислота, ФСК – фенолсалициловая кислота, ВРП – водорастворимый полимер.

\*Различия достоверны по отношению к контролю при  $p \leq 0,05$

Fig. 3. The effect of salicylates on the content of Chl (a+b) (a) and carotenoids (b) in barley leaves per unit of raw mass at the stages of earing and milk ripeness: K – control, СК – salicylic acid; ФСК – phenylsalicylic acid; ВРП – water solvent polymer.

\*Differences are significant in relation to control at  $p \leq 0,05$

Реализация эффектов СК в значительной степени связана с активацией окислительных процессов в растительных клетках, что может быть обусловлено регулированием про/антиоксидантного равновесия. Было выявлено, что обработка ЗСС на основе СК вызывала увеличение активности перекисного окисления мембранных липидов в клетках мезофилла ячменя от 40 % на стадии колошения до 60 % в фазу молочно-восковой спелости по сравнению с необработанным контролем на соответствующих стадиях развития (рис. 4).

Такое увеличение интенсивности окислительных процессов под влиянием обработки салицилатами, приводящее к своевременной активации токсичных продуктов ПОЛ, по-видимому, способствует угнетению развития патогена и снижению зараженности растений в условиях комплексного действия факторов внешней среды.

Одним из наиболее важных антиоксидантных ферментов, участвующих в реализации неспецифического иммунитета, является пероксидаза, активность и спектр изоформ которой меняются под действием биологических и небиологических агентов. Нами было обнаружено возрастание активности внутриклеточной пероксидазы на 21 % под влиянием обработки СК в фазе колошения и на 60 % в фазу молочно-восковой спелости (рис. 5). Обработка растений ФСК не оказывала достоверного влияния на уровень активности фермента на протяжении всего периода наблюдений. Повышение активности пероксидазы [19] связывают с развитием защитных реакций в растениях и формированием системной приобретенной устойчивости. Таким образом, полученные результаты косвенно

указывают на формирование неспецифического иммунитета в растениях ячменя под влиянием изученных салицилатов.

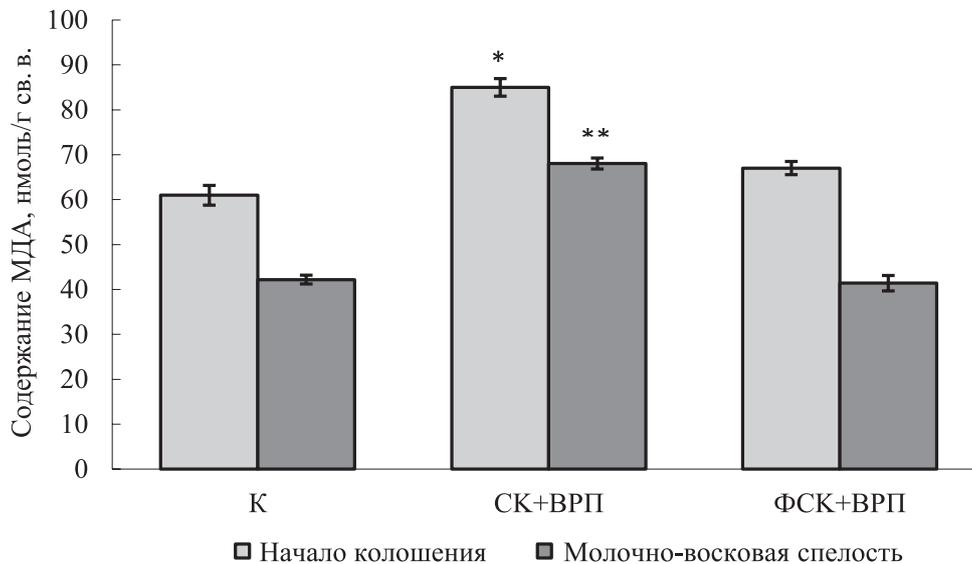


Рис. 4. Влияние салицилатов на активность процессов ПОЛ в растениях ячменя: К – контроль, СК – салициловая кислота, ФСК – фенолсалициловая кислота, ВРП – водорастворимый полимер. \*Различия достоверны по отношению к контролю при  $p \leq 0,05$

Fig. 4. The effect of salicylates on the activity of POL processes in barley plants: К – control, СК – salicylic acid; ФСК – phenylsalicylic acid; ВРП – water solvent polymer. \*Differences are significant in relation to control at  $p \leq 0.05$

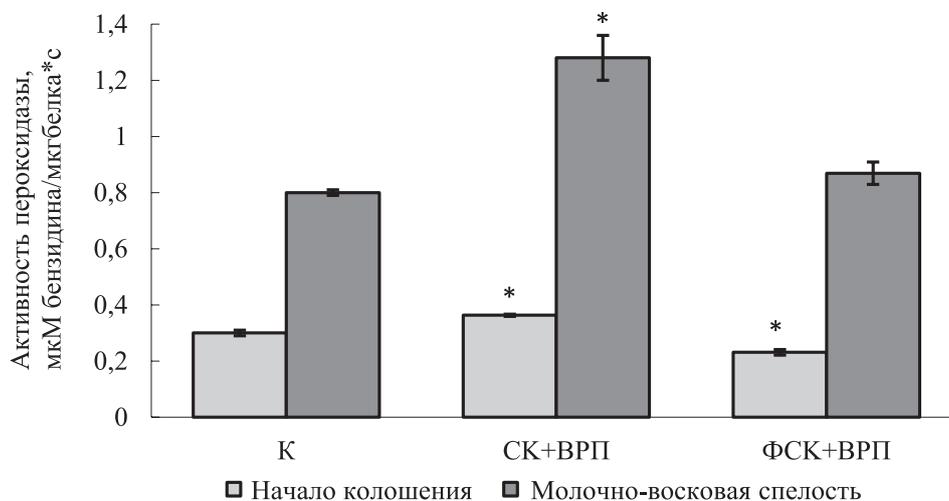


Рис. 5. Влияние салицилатов на активность пероксидазы в растениях ячменя: К – контроль, СК – салициловая кислота, ФСК – фенолсалициловая кислота, ВРП – водорастворимый полимер. \*Различия достоверны по отношению к контролю при  $p \leq 0,05$

Fig. 5. The effect of salicylates on peroxidase activity in barley plants: К – control, СК – salicylic acid; ФСК – phenylsalicylic acid; ВРП – water solvent polymer. \*Differences are significant in relation to control at  $p \leq 0.05$

Оценка поражения растений болезнями, проведенная согласно методике [20] в посевах ячменя на стадии молочно-восковой спелости, свидетельствует о положительном влиянии салицилатов на устойчивость растений к фитопатогенам (табл. 6). После применения ЗСС процент поражения листовой поверхности ячменя болезнями снижился (см. табл. 6) и, как следствие, к моменту созревания наблюдалось увеличение количества растений в расчете на 1 м<sup>2</sup> площади посева, что свидетельствует о повышении их устойчивости к болезням под влиянием СК и ФСК.

Повышение устойчивости растений ячменя в период вегетации отразилось на урожайности изученной культуры (табл. 7). Зерновая продуктивность ячменя повысилась к уровню контроля в посевах, где были использованы СК и ФСК на 4,3 и 5,2 ц/га соответственно.

Таблица 6

Оценка устойчивости растений ярового ячменя к поражению болезнями в фазе молочно-восковой спелости

Table 6

Estimation of the resistance of spring barley plants to disease damage in the phase of milk-wax ripeness

Вариант	Количество растений, шт./м <sup>2</sup>	Шкала устойчивости растений к поражению болезнями на стадии молочно-восковой спелости, баллы / % поражения листа
К	217 ± 5	5 / 11–25 %
Адексар	231 ± 4	7 до 10 %
СК + ВРП	235 ± 3*	7 до 10 %
ФСК + ВРП	244 ± 7*	7 до 10 %

СК – салициловая кислота, ФСК – фенилсалициловая кислота, ВРП – водорастворимый полимер.  
Примечание. \*Различия по сравнению с контролем достоверны при  $p \leq 0,05$ .

Таблица 7

Влияние салицилатов на основе салицилатов на показатели структуры урожая ярового ячменя после уборки

Table 7

The effect of salicylates- on the crop's structure of the spring barley plants after harvesting

Вариант	Количество продуктивных стеблей, шт./м <sup>2</sup>	Масса зерен в колосе, г	Урожайность, ц/га
Контроль	450,0	0,73	32,9
Адексар	462,0	0,80	37,0*
СК + ВРП	446,0	0,83*	37,2*
ФСК + ВРП	488,0*	0,78	38,1*
НСР <sub>05</sub>	18,6	0,09	2,9

СК – салициловая кислота, ФСК – фенилсалициловая кислота, ВРП – водорастворимый полимер.  
Примечание. \*Различия по сравнению с контролем достоверны при  $p \leq 0,05$ .

Для выяснения характера действия СК и ее производного ФСК, а также продолжительности их действия в полевых условиях была проведена повторная обработка растений ячменя в фазу начала колошения. По большинству исследуемых параметров получены сходные результаты с однократной обработкой растений. Исходя из полученных данных, можно сделать заключение о том, что СК и ФСК индуцируют системную устойчивость растений, которая пролонгируется на весь период вегетации, что исключает необходимость повторной обработки посевов.

Полученные результаты расширяют фундаментальные знания о механизмах иммунитета растений и создают теоретическую основу для разработки препаратов нового поколения, индуцирующих устойчивость растений к инфекционным грибным болезням. На основании проведенных исследований, в целях повышения устойчивости ярового ячменя к ряду фитопатогенных заболеваний, были разработаны рецептура, технология и методические указания по применению препарата «Имуносал-В» («Имунакт-СК»), содержащего СК и ВРП-3, который рекомендован для обработки вегетирующих растений ярового ячменя. Использование данного препарата позволяет снизить применение экологически опасных химических фунгицидов при возделывании ярового ячменя, исключив их внесение на стадии колошения.

### Заключение

Установлено, что обработка растений ячменя салицилатом ( $10^{-4}$  М) по вегетации в условиях фитотрона способствует повышению их устойчивости к заражению грибом *B. sorokiniana*, снижая процент поражения листовой поверхности до 20 % относительно контрольного уровня (40–50 %). Экзогенный салицилат нивелировал ингибирующее действие патогена на массу и высоту растений ячменя, способствовал повышению содержания фотосинтетических пигментов в листовых тканях на 6–27 % в зависимости от стадии развития, что способствовало увеличению до контрольных значений массы колоса, сниженной на 20 % в инфицированных растениях, и выхода соломы на 36 % к контролю. В полевых условиях использование ЗСС на основе СК или ее производного ФСК в посевах ярового ячменя в фазе выхода в трубку оказывает ростостимулирующий эффект, способствует увеличению содержания фотосинтетических пигментов

в листьях в фазу молочно-восковой спелости и пероксидазной активности в фазах колошения и молочно-восковой спелости, что обеспечивает формирование высокопродуктивного и устойчивого фитоценоза и прибавку урожая зерна (4–5 ц/га) на уровне стандартного химического фунгицида.

Полученные результаты расширяют фундаментальные знания о механизмах иммунитета растений и создают теоретическую основу для использования салицилатов для разработки препаратов нового поколения, индуцирующих устойчивость растений ячменя к инфекционным грибным болезням.

### Библиографические ссылки

1. Dai WB. Research on prevention and control of chinese agricultural ecological environment pollution to ensure food safety. *Advanced Materials Research-Switz*. 2013;616–618:2247–2250. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.616-618.2247.
2. Jones AME, Monaghan J, Ntoukakis V. Editorial: Mechanisms regulating immunity in plants. *Front. Plant Science*. 2013;4:64. DOI:10.3389/fpls.2013.00064.
3. Dewen Q, Yijie D, Yi Z. Plant Immunity Inducer Development and Application. *MPMI*. 2017;30(5):355–360. DOI: 10.1094/MPMI-11-16-0231-CR.
4. Kumar D. Salicylic acid signaling in disease resistance. *Plant Science*. 2014;228:127–134. DOI: 10.1016/j.plantsci.2014.04.014.
5. Dempsey DMA, Klessig DF. How does the multifaceted plant hormone salicylic acid combat disease in plants and are similar mechanisms utilized in humans? *BMC Biology*. 2017;15:23. DOI: 10.1186/s12915-017-0364-8.
6. White RF. Acetylsalicylic acid (aspirin) induces resistance to tobacco mosaic virus in tobacco. *Virology*. 1979;99:410–412. DOI: 10.1016/0042-6822(79)90019-9.
7. Sudisha J, Sharathchandra RG., Amruthesh KN. Pathogenesis Related Proteins in Plant Defense Response. In: Merillon JM, Ramawat KG, editors. *Plant Defence*. 2012:379–403. DOI:10.1007/978-94-007-1933-0\_17.
8. Asai T, Stone JM. Fumosis B1 induced cell death in Arabidopsis protoplasts requires jasmonate-, ethylene-, and salicylate-dependent signaling pathways. *Plant Cell*. 2000;12(10):1823–1836. DOI: 10.1105/tpc.12.10.1823.
9. Ádám AL, Nagy ZÁ, Kátay G. Systemic Immunity in Plants: Biochemical Signals and the Challenge for Practical Application. *EC Agriculture*. 2019;5(2):57–60. DOI: 10.3390/ijms19041146.
10. Wani AB, Chadar H, Wani AH. Salicylic acid to decrease plant stress. *Environmental Chemistry Letters*. 2017;15:101–123. DOI: 10.1007/s10311-016-0584-0.
11. Jain N. Screening of barley germplasm for leaf blight (*Bipolaris sorokiniana*) resistance. *Indian Journal of Agricultural Research*. 2014;48(1):67–71. DOI: 10.5958/j.0976-058X.48.1.012.
12. Kumar J, Schäfer P, Hükelhoven R. *Bipolaris sorokiniana*, a cereal pathogen of global concern: cytological and molecular approaches towards better control. *Molecular Plant Pathology*. 2002;3(4):185–195. DOI: 10.1046/j.1364-3703.2002.00120.x.
13. Доспехов БА. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*. Москва: Агропромиздат; 1985.
14. Зеленский МИ, Быков ОД. *Терминология количественных характеристик при изучении роста, продуктивности и фотосинтеза сельскохозяйственных растений*. Ленинград: [б. и.]; 1982.
15. Мерзляк МН. Активированный кислород и окислительные процессы в мембранах растительной клетки. *Итоги науки и техники. Серия Физиология растений*. 1989;6:111–123.
16. Гавриленко ВФ, Ладыгина МЕ, Хандобина ЛМ. *Большой практикум по физиологии растений*. Москва: Высшая школа; 1975. 392 с.
17. Mohanty JG, Jaffe JS, Schulman ES. A highly sensitive fluorescent micro-assay of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> release from activated human leukocytes using a dehydroxyphenoxazine derivative. *Journal Immunology Methods*. 1997;202(2):133–141. DOI: 10.1016/S0022-1759(96)00244-x.
18. Шлык АА. Определение хлорофилла и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев. В: *Биохимические методы в физиологии растений*. Москва: Наука; 1971.
19. Zhou Zh, Guan H, Liu C. Identification of genomic regions affecting grain peroxidase activity in bread wheat using genome-wide association study. *BMC Plant Biology*. 2021;21:523. DOI: 10.1186/s12870-021-03299-6.
20. Привалов ФИ, Кадыров МА, Матыс ИС. *Унифицированный классификатор ячменя *Hordeum L. spp.** Минск: [б. и.]; 2012. 46 с.

### References

1. Dai WB. Research on prevention and control of chinese agricultural ecological environment pollution to ensure food safety. *Advanced Materials Research-Switz*. 2013;616–618:2247–2250. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.616-618.2247.
2. Jones AME, Monaghan J, Ntoukakis V. Editorial: Mechanisms regulating immunity in plants. *Front. Plant Science*. 2013;4:64. DOI:10.3389/fpls.2013.00064.
3. Dewen Q, Yijie D, Yi Z. Plant Immunity Inducer Development and Application. *MPMI*. 2017;30(5):355–360. DOI: 10.1094/MPMI-11-16-0231-CR.
4. Kumar D. Salicylic acid signaling in disease resistance. *Plant Science*. 2014;228:127–134. DOI: 10.1016/j.plantsci.2014.04.014.
5. Dempsey DMA, Klessig DF. How does the multifaceted plant hormone salicylic acid combat disease in plants and are similar mechanisms utilized in humans? *BMC Biology*. 2017;15:23. DOI: 10.1186/s12915-017-0364-8.
6. White RF. Acetylsalicylic acid (aspirin) induces resistance to tobacco mosaic virus in tobacco. *Virology*. 1979;99:410–412. DOI: 10.1016/0042-6822(79)90019-9.
7. Sudisha J, Sharathchandra RG., Amruthesh KN. Pathogenesis Related Proteins in Plant Defense Response. In: Merillon JM, Ramawat KG, editors. *Plant Defence*. 2012:379–403. DOI:10.1007/978-94-007-1933-0\_17.
8. Asai T, Stone JM. Fumosis B1 induced cell death in Arabidopsis protoplasts requires jasmonate-, ethylene-, and salicylate-dependent signaling pathways. *Plant Cell*. 2000;12(10):1823–1836. DOI: 10.1105/tpc.12.10.1823.
9. Ádám AL, Nagy ZÁ, Kátay G. Systemic Immunity in Plants: Biochemical Signals and the Challenge for Practical Application. *EC Agriculture*. 2019;5(2):57–60. DOI: 10.3390/ijms19041146.

10. Wani AB, Chadar H, Wani AH. Salicylic acid to decrease plant stress. *Environmental Chemistry Letters*. 2017;15:101-123. DOI: 10.1007/s10311-016-0584-0.
11. Jain N. Screening of barley germplasm for leaf blight (*Bipolaris sorokiniana*) resistance. *Indian Journal of Agricultural Research*. 2014;48(1):67–71. DOI: 10.5958/j.0976-058X.48.1.012.
12. Kumar J, Schäfer P, Hüchelhoven R. *Bipolaris sorokiniana*, a cereal pathogen of global concern: cytological and molecular approaches towards better control. *Molecular Plant Pathology*. 2002;3(4):185–195. DOI: 10.1046/j.1364-3703.2002.00120.x.
13. Dospikhov BA. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow: Agropromizdat; 1985. Russian.
14. Zelensky MI, Bykov OD. *Terminologiya kolichestvennykh kharakteristik pri izuchenii rosta, produktivnosti i fotosinteza sel'skokhozyaystvennykh rasteniy: Metodicheskiye ukazaniya* [Terminology of quantitative characteristics in the study of growth, productivity and photosynthesis of agricultural plants: Methodological guidelines]. Leningrad: [publisher unknown]; 1982. Russian.
15. Merzlyak MN. *Aktivirovannyi kislorod i okislitel'nyye protsessy v membranakh rastitel'noy kletki* [Activated oxygen and oxidative processes in plant cell membranes]. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya Fiziologiya rastenii* [Results of science and technology. Plant physiology series]. 1989;6:111–123. Russian.
16. Gavrilenko VF, Ladygina ME, Khandobina LM. *Bol'shoy praktikum po fiziologii rasteniy* [Large workshop on plant physiology]. Moscow: Vysshaya shkola; 1975. 392 p. Russian.
17. Mohanty JG, Jaffe JS, Schulman ES. A highly sensitive fluorescent micro-assay of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> release from activated human leukocytes using a dehydroxyphenoxazine derivative. *Journal Immunology Methods*. 1997;202(2):133–141. DOI: 10.1016/s0022-1759(96)00244-x.
18. Shlyk AA. Determination of chlorophyll and carotenoids in extracts of green leaves]. In: *Biokhimicheskiye metody v fiziologii rasteniy* [Biochemical methods in plant physiology]. Moscow: Nauka; 1971. Russian.
19. Zhou Zh, Guan H, Liu C. Identification of genomic regions affecting grain peroxidase activity in bread wheat using genome-wide association study. *BMC Plant Biology*. 2021;21:523. DOI: 10.1186/s12870-021-03299-6.
20. Privalov FI, Kadyrov MA, Matys IS. *Unifitsirovannyi klassifikator yachmenya Hordeum L. spp.* [Unified classifier of barley *Hordeum L. spp.*]. Minsk: [publisher unknown]; 2012. 46 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 22.02.2022.  
Received by editorial board 22.02.2022.

УДК 634.737:581.5:581.522.4(476)

## ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА БИОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИКРОЗЕЛЕНИ ГОРОХА ОВОЩНОГО

А. М. ПАШКЕВИЧ<sup>1)</sup>, А. И. ЧАЙКОВСКИЙ<sup>1)</sup>, Ж. А. РУПАСОВА<sup>2)</sup>, Т. И. ВАСИЛЕВСКАЯ<sup>2)</sup>, Н. Б. КРИНИЦКАЯ<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт овощеводства Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Ковалёва, 2, 223013, а/г Самохваловичи, Минский район, Беларусь

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

Приведены результаты сравнительного исследования в производственном эксперименте влияния продолжительности светодиодного освещения (8, 10, 12, 14, 16 ч) на 13 характеристик биохимического состава микрозелени гороха овощного (сорт Павлуша) – содержание сухих, дубильных и пектиновых веществ, свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот, растворимых сахаров, общего протеина и альбуминов, основных групп биофлавоноидов и показатель сахарокислотного индекса. Содержание сухих веществ в исследуемых образцах варьировалось (в рамках эксперимента) в диапазоне 9,3–11,8 % при содержании в сухой массе свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот 4,35–8,46 %, 359,8–487,8 мг/100 г и 1465,1–1956,0 мг/100 г соответственно. Содержание растворимых сахаров было от 8,8 до 13,2 % при значительных межвариантных различиях показателя сахарокислотного индекса, изменявшегося в интервале 1,04–3,03. При этом параметры накопления пектиновых веществ составляли 3,88–4,54 %, при содержании дубильных веществ 1,23–1,92 %. Установлено практически полное отсутствие в микрозелени гороха антоциановых пигментов, тогда как содержание флавонолов варьировалось в диапазоне 1711,7–2189,2 мг/100 г, а катехинов – 376,7–483,0 мг/100 г. При этом было обнаружено весьма высокое содержание в ней протеинов и наиболее ценной легкоусвояемой их части – растворимых белков (альбуминов), варьировавшееся в рамках эксперимента в мг/г сухой массы в диапазонах 412,3–443,4 и 8,38–18,0.

Значительная ширина диапазонов варьирования биохимических характеристик микрозелени гороха свидетельствовала об их существенной зависимости от продолжительности светодиодного освещения, имевшей весьма неоднозначный характер. Так, наименее значительные изменения в биохимическом составе микрозелени гороха относительно контроля (12-часовая экспозиция) выявлены при 10- и 14-часовой продолжительности освещения, тогда как наибольшие – при 8- и особенно при 16-часовой. При этом наиболее высокий интегральный уровень питательной и витаминной ценности производимой продукции по совокупности биохимических характеристик установлен при 14-часовом освещении, тогда как минимальный – при 8-часовом.

### Образец цитирования:

Пашкевич АМ, Чайковский АИ, Рупасова ЖА, Василевская ТИ, Криницкая НБ. Влияние продолжительности светодиодного освещения на биохимический состав микрозелени гороха овощного. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;1:37–45.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-37-45>

### For citation:

Pashkevich HM, Tcaikovskiy AI, Rupasova ZhA, Vasilevskaya TI, Krinitckaya NB. The influence of the duration of led lighting on the biochemical composition of the peas microgreens. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;1:37–45. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-37-45>

### Авторы:

**Анна Михайловна Пашкевич** – аспирант; заведующий сектором бобовых овощных культур.  
**Андрей Иванович Чайковский** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; директор.  
**Жанна Александровна Рупасова** – доктор биологических наук, профессор; член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси; заведующий лабораторией химии растений.  
**Тамара Ивановна Василевская** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории химии растений.  
**Наталья Болеславовна Криницкая** – научный сотрудник лаборатории химии растений.

### Authors:

**Hanna M. Pashkevich**, graduate student; head of the legume vegetable crops sector.  
[faba@belniio.by](mailto:faba@belniio.by)  
**Andrey I. Tchaikovskiy**, PhD (agriculture), docent; director.  
[director@belniio.by](mailto:director@belniio.by)  
**Zhanna A. Rupasova**, doctor of science (biology), full professor; corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus; head of the laboratory of plant chemistry.  
[j.rupasova@cbg.org.by](mailto:j.rupasova@cbg.org.by)  
**Tamara I. Vasilevskaya**, PhD (biology); senior researcher at the laboratory of plant chemistry.  
[t.vasileuskaya@cbg.org.by](mailto:t.vasileuskaya@cbg.org.by)  
**Natalya B. Krinitckaya**, researcher at the laboratory of plant chemistry.  
[n.krinitckaya@cbg.org.by](mailto:n.krinitckaya@cbg.org.by)

**Ключевые слова:** продолжительность светодиодного освещения; горох овощной; микрозелень; биохимический состав; органические кислоты; углеводы; белки; биофлавоноиды; питательная и витаминная ценность продукции.

**Благодарность.** Исследования выполнены в рамках Государственной программы научных исследований «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность», подпрограммы 6 «Земледелие и селекция», задания 2.7.3 «Исследование биометрических показателей, продуктивности и биохимического состава микрозелени при выращивании в условиях искусственного освещения на основе светодиодов».

## THE INFLUENCE OF THE DURATION OF LED LIGHTING ON THE BIOCHEMICAL COMPOSITION OF THE PEAS MICROGREENS

*H. M. PASHKEVICH<sup>a</sup>, A. I. TCAIKOVSKY<sup>a</sup>, Z. A. RUPASOVA<sup>b</sup>, T. I. VASILEVSKAYA<sup>b</sup>, N. B. KRINITCKAYA<sup>b</sup>*

*<sup>a</sup>The Institute of Vegetable Growing, National Academy of Sciences of Belarus,  
2 Kavaleva Street, agro-town Samakhalavichy, Minsk district 223013, Belarus*

*<sup>b</sup>Central Botanical Garden, National Academy of Sciences of Belarus,  
2v Surganova Street, 220012 Minsk, Belarus*

*Corresponding author: Zh. A. Rupasova (j.rupasova@cbg.org.by)*

The results of a comparative study of the effect of the duration of LED lighting are presented (8, 10, 12, 14, 16 hour) on 13 characteristics of the biochemical composition of vegetable peas microgreens (Pavlusha variety) – the content of dry, tannic and pectin substances, free organic, ascorbic and hydroxycinnamic acids, soluble sugars, total protein and albumins, the main groups of bioflavonoids and the indicator of the sugar acid index.

The dry matter content in the studied samples was 9.3–11.8 %, the content of free organic, ascorbic and hydroxycinnamic acids in the dry mass was 4.35–8.46 %, 359.8–487.8 mg/100 g and 1465.1–1956.0 mg/100 g, respectively. The content of soluble sugars was from 8.8 to 13.2 % with significant variant differences in the indicator of the sugar acid index, which varied in the range of 1.04–3.03. At the same time, the parameters of the accumulation of pectin substances were 3.88–4.54 %, the content of tannins – 1.23–1.92 %. The almost complete absence of anthocyanin pigments in the pea microgreens was found, the content of flavonols varied in the range of 1711.7–2189.2 mg/100 g, and catechins – 376.7–483.0 mg/100 g. At the same time, a high content of proteins and their valuable part – soluble proteins (albumins), which varied in mg/g of dry weight in the ranges of 412.3–443.4 and 8.38–18.0, was found in the microgreens.

The considerable width of the ranges of variation of the biochemical characteristics of the micro-green peas testified to their significant dependence on the duration of LED lighting, which was ambiguous. The least significant changes in the biochemical composition of peas microgreens relative to the control (12 hours duration) were detected at 10 and 14 hours of illumination duration, while the greatest – at 8 and especially at 16 hours duration. At the same time, the highest integral level of nutritional and vitamin value of products according to the totality of biochemical characteristics is set at 14 hours of illumination, while the minimum is at 8 hours.

**Keywords:** duration of LED lighting; peas; micro-greens; biochemical composition; organic acids; carbohydrates; proteins; bioflavonoids; nutritional and vitamin value of products.

**Acknowledgment.** The research was carried out within the framework of the State Research Program «Agricultural Technologies and Food Security», subprogram 6 «Agriculture and breeding», task 2.7.3 «Study of biometric indicators, productivity and biochemical composition of microgreens when grown under artificial lighting conditions based on LEDs».

### Введение

В последние годы в Беларуси наметилась тенденция к существенному увеличению спроса на продукцию микрозелени овощных культур, в том числе гороха овощного как источника широкого спектра полезных веществ. Вместе с этим значимым аспектом при выращивании микрозелени в условиях закрытой контролируемой среды является освещение, которое для высших растений одновременно является сигналом к росту и развитию и источником энергии [1]. Растения адаптируются к условиям световой среды не только изменениями морфобиологических показателей, но и перестройкой своего светособирающего комплекса [2].

Наиболее важными параметрами режима освещения являются: фотопериод (продолжительность освещения), спектральный состав света, величина плотности потока фотонов и характер излучения. Особенно значительно влияет на растения продолжительность освещения, определяющая как рост биомассы, так и накопление вторичных метаболитов [3].

Использование искусственных светодиодных источников света в культуре микрозелени во всем мире ведется в направлении поиска оптимальных режимов освещения, обеспечивающих высокий биохимический состав и высокие продукционно-биометрические характеристики данного продукта [4–9].

Однако в зарубежной литературе встречается крайне ограниченное количество информации касательно продолжительности светодиодного освещения при выращивании микрозелени, а в отечественной литературе эти данные отсутствуют вовсе. По этой причине в 2020–2021 гг. были проведены эксперименты с использованием ряда режимов светодиодного освещения, важнейшим из которых являлась продолжительность его воздействия на опытные растения. При этом одной из задач исследований являлось установление оптимальной продолжительности фотопериода, обеспечивающей наиболее высокий уровень питательной и витаминной ценности микрозелени гороха по совокупности биохимических характеристик – содержанию сухих, пектиновых и дубильных веществ, свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот, растворимых сахаров, протеинов, альбуминов, катехинов, флавонолов и показателю сахарокислотного индекса.

### Материалы и методы исследований

Исследования выполнены в рамках производственного эксперимента на образцах микрозелени гороха овощного (сорт Павлуша). Семена отбирались из существующей коллекции генетических ресурсов овощных культур РУП «Институт овощеводства». Предварительно была определена лабораторная всхожесть и энергия прорастания отобранных семян лабораторным методом для исключения фактора использования посевного материала с низкими кондиционными показателями. Установленная всхожесть находилась на уровне 98 %, энергия прорастания – на уровне 97 %. Посевной материал гороха овощного промывался и выдерживался в отстоянной воде (комнатной температуры + 22 °С, pH – 7,7, содержание хлора – не более 1,1 мг/л) в течение 12 часов. Перед посевом семена дезинфицировались 3%-ным раствором перекиси водорода и снова промывались; посев выполнялся сплошным методом из расчета 600 шт. семян на делянку. Полив проводился через сутки по 60 мл на делянку отстоянной водопроводной водой ранее указанных характеристик.

Культивирование микрозелени проводилось в полипластовых поддонах (179×132 мм, объемом 750 мл), стерилизуемых 96 % этиловым спиртом. В качестве грунта для выращивания использовался подготовленный торфяной субстрат, проавтоклавированный в паровом автоклаве ВК-75-01 (время стерилизационной выдержки – 20 мин, при температуре  $132 \pm 2$  °С и давлении 0,1 МПа). Опыты закладывались в трехкратной повторности в три цикла выращивания. Расположение делянок – случайное (рэндомизированное), размер одной делянки составлял 237 см<sup>2</sup> (17,9×13,2 см), площадь под одним вариантом – 0,4 м<sup>2</sup>.

Выращивание опытных растений осуществлялось в условиях светокультуры в фитотроне, оснащенный облучательной фитоустановкой стеллажного типа FLORA LED 300/2/4 разработки и производства Государственного научно-производственного унитарного предприятия «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси». Установка была оснащена десятью светодиодными светильниками ДСП08-3х12-004 УХЛ4 при продолжительности освещения 8, 10, 12, 14 и 16 часов. В качестве контроля было принято значение фотопериода, равное 12 час.

Основные технические характеристики используемого в опыте светильника сводились к следующим показателям: класс светораспределения – П, тип кривой силы света – Д, поток излучения – 16 Вт, поток фотонов – 80 мкмоль/с, фотосинтетический поток фотонов 75 мкмоль/с, КПД светильника – 43 %, эффективность потока фотонов 2,1 мкмоль/с. Спектр излучения светодиодных светильников ДСП08-3х12-004 УХЛ4 находился в диапазоне длин волн от 380 до 780 нм, включая фотосинтетически активную радиацию. Наличие в излучении квантов света различных длин волн обеспечивало ход всего многообразия фотобиологических процессов, присущих растительным организмам. В качестве источника света в светильнике были применены высокоэффективные энергосберегающие светодиоды компании «NICHIA Corporation» (Япония) в сочетании со специальной технологией получения оптимального спектра на основе люминофорных композиций разработки НПУП «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси».

Исследование биохимического состава образцов микрозелени гороха овощного осуществляли по широкому спектру показателей, относящихся к разным классам действующих веществ. В свежих усредненных пробах растительного материала определяли содержание сухих веществ – по ГОСТ 28561-90<sup>1</sup>; аскорбиновой кислоты (витамина С) – стандартным индофенольным методом; титруемых кислот (общей кислотности) – объемным методом [10].

В высушенных при температуре 60 °С пробах растительного материала определяли содержание: гидроксикоричных кислот (в пересчете на хлорогеновую) – спектрофотометрическим методом [11]; растворимых сахаров – ускоренным полумикрометодом [4]; пектиновых веществ – кальциево-пектатным методом [10]; суммы антоциановых пигментов – по методу Т. Swain, W. E. Hillis [13], с построением градуировочной кривой по кристаллическому цианидину, полученному из плодов аронии черноплодной и очищенному по методике Ю. Г. Скориковой и Э. А. Шафтан [14]; собственно антоцианов и суммы катехинов (с использованием ванилинового реактива) – фотоэлектроколориметрическим методом [10; 15];

<sup>1</sup>ГОСТ 32195-2013. Корма, комбикорма. Метод определения содержания аминокислот. Введ. 01.07.2015. Москва: Стандартинформ, 2014.

суммы флавонолов (в пересчете на рутин) – спектрофотометрическим методом [10]; дубильных веществ (танинов) – титрометрическим методом Левенталя [16]. Общее содержание протеинов определяли методами формольного и потенциометрического титрования с введением поправочных коэффициентов [17] и предварительным проведением гидролиза белков в соответствии с протоколами пробоподготовки образцов для аминокислотного анализа<sup>□</sup>. Определение содержания альбуминов (растворимых белков) осуществляли по методу [18]. Выделение их из 3 г сырого растительного материала, предварительно растертого в жидком азоте, проводили с использованием в качестве экстрагента 15 мл 0,1 М NaCl при температуре + 4 °С в течение 2 ч при постоянном помешивании. Калибровочную кривую для количественного определения растворимых белков в исследуемых образцах строили по БСА (бычьему сывороточному альбумину) в концентрации от 10 до 500 мкг/мл. Все измерения и определения выполнены в 2-кратной биологической и 3-кратной аналитической повторности с последующей статистической обработкой экспериментальных данных по методике, принятой для биологических исследований с использованием программы *Microsoft Office Excel 2007*. Выявление самого эффективного варианта опыта, обеспечившего наиболее высокий интегральный уровень питательной и витаминной ценности микрорзелени гороха овощного, осуществляли с использованием авторского способа ранжирования объектов по совокупности анализируемых признаков, защищенного патентом [21].

### Результаты исследований и их обсуждение

Повариантное исследование биохимического состава микрорзелени гороха овощного показало существенную зависимость его количественных характеристик от продолжительности светодиодного освещения. По нашим данным, содержание сухих веществ в исследуемых образцах варьировалось в рамках эксперимента в диапазоне 9,3–11,8 % при содержании в сухой массе свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот 4,35–8,46 %, 359,8–487,8 мг/100 г и 1465,1–1956,0 мг/100 г соответственно, растворимых сахаров – от 8,8 до 13,2 % при значительных межвариантных различиях показателя сахарокислотного индекса, изменявшегося в интервале 1,04–3,03. При этом параметры накопления пектиновых веществ составляли 3,88–4,54 %, при содержании дубильных веществ – 1,23–1,92 %. Установлено практически полное отсутствие в микрорзелени гороха антоциановых пигментов, тогда как содержание флавонолов варьировалось в диапазоне 1711,7–2189,2 мг/100 г, а катехинов – 376,7–483,0 мг/100 г. При этом было обнаружено весьма высокое содержание в ней протеинов и наиболее ценной легкоусвояемой их части – растворимых белков (альбуминов), варьировавшееся в рамках эксперимента в мг/г сухой массы в диапазонах 412,3–443,4 и 8,38–18,0.

Значительная ширина диапазонов варьирования биохимических характеристик микрорзелени гороха свидетельствовала об их существенной зависимости от продолжительности светодиодного освещения, имевшей весьма неоднозначный характер. Как следует из табл. 1, при 8-часовом воздействии на растения исследуемого фактора было показано отставание на 8 % от контроля содержания сухих веществ, тогда как при 10-часовом – нивелирование различий с ним в этом плане, а при более продолжительном воздействии – активизация их накопления на 6–17 %. При этом 8-часовая экспозиция стимулировала биосинтез свободных органических кислот, что подтверждалось превышением контрольного уровня их накопления на 35 %, тогда как 14- и 16-часовая приводили к обеднению микрорзелени данными соединениями на 13–30 % при отсутствии достоверных различий с контролем при 10-часовом освещении. В большинстве вариантов опыта выявлено снижение на 11–26 % содержания в ней аскорбиновой кислоты, и лишь при 14-часовом освещении было показано отсутствие достоверных различий с контролем по данному признаку. Что касается гидроксикоричных кислот, то активизация их биосинтеза на 4–12 % по сравнению с контролем обнаружена лишь при 10- и 14-часовой экспозициях при отставании от него на 16 % по этому показателю при 8-часовой продолжительности освещения.

Вместе с тем незначительное обеднение микрорзелени гороха растворимыми сахарами, не превышавшее 5–6 %, наблюдалось лишь при 8-часовой продолжительности освещения, тогда как по мере увеличения последней имела место прогрессирующая активизация их накопления на 11–41 %, максимальная при 16-часовой экспозиции (см. табл. 1). Это объясняет заметное снижение сахарокислотного индекса микрорзелени гороха относительно контроля только при 8-часовом освещении (на 30 %) и весьма значительное, достигавшее 44–103 %, его увеличение при 14- и 16-часовом. Заметим, что наименее выраженное стимулирующее действие исследуемого фактора на биосинтез растворимых сахаров и увеличение показателя сахарокислотного индекса установлено на фоне 10-часовой экспозиции.

Наряду с этим при 8-часовой продолжительности освещения в микрорзелени гороха выявлено ослабление на 9 % накопления пектиновых веществ по сравнению с контролем и нивелирование различий с ним по данному показателю при 10-часовой (см. табл. 1). При этом увеличение времени воздействия исследуемого фактора до 14 ч не оказало значимого влияния на содержание этих соединений, и лишь при 16-часовой экспозиции отмечено незначительное увеличение их содержания. Что касается дубильных веществ, то для них

было показано преимущественное снижение содержания относительно контроля, наиболее значительное при 8- и особенно 10-часовой продолжительности освещения, достигавшее соответственно 26 и 36 %, и лишь при 14-часовой экспозиции не обнаружено статистически значимых различий с контролем по данному признаку.

Заметим, что в составе Р-витаминного комплекса микрозелени гороха не обнаружено присутствия антоциановых пигментов, в связи с чем ключевая роль в формировании его ответа на продолжительность светодиодного освещения принадлежала флавонолам и катехинам. Как следует из табл. 1, на фоне 8-часовой экспозиции наблюдалось снижение на 15 % общего содержания биофлавоноидов относительно контроля. Увеличение же продолжительности освещения способствовало незначительному (в пределах 7 %) усилению их накопления только при 10- и 14-часовом освещении, тогда как при 16-часовом имело место снижение данного показателя на 11 % относительно контроля. Аналогичный характер динамики в зависимости от продолжительности освещения наблюдался и у флавонолов, как у доминирующей группы этих соединений, поскольку их содержание в 3,8–5 раз превышало таковое катехинов. При этом на фоне 10- и особенно 8-часовой экспозиций наблюдалось снижение содержания последних соответственно на 8 и 20 % относительно контроля, тогда как при более длительном воздействии исследуемого фактора на опытные растения установлено нивелирование различий с ним по данному признаку.

Тем не менее продолжительность светодиодного освещения не оказала существенного влияния на общее количество белков в микрозелени гороха, что подтверждалось невысокой вариабельностью его содержания в рамках эксперимента, обусловившей маловыразительные, хотя и достоверные, различия тестируемых вариантов опыта с контролем по данному признаку, не превышавшие 2–4 % (см. табл. 1). При этом только минимальная 8-часовая продолжительность светодиодного освещения незначительно (не более чем на 3 %) ингибировала его накопление, тогда как при увеличении времени воздействия данного фактора наблюдалось усиление накопления общего белка на 2–4 % относительно контроля, наибольшее при 10-часовой экспозиции.

Однако продолжительность светодиодного освещения оказала весьма заметное влияние на накопление в микрозелени гороха альбуминов, для которых обнаружен весьма ощутимый ингибирующий эффект, в наибольшей степени проявившийся на фоне 8-часовой и особенно 16-часовой экспозиций, что подтверждалось снижением их содержания по сравнению с контролем соответственно на 13 и 47 % (см. табл. 1). Что касается 10- и 14-часовой продолжительности светодиодного освещения, то в первом случае наблюдалась активизация накопления альбуминов на 14 %, тогда как во втором – отсутствие изменений относительно контроля.

Можно убедиться, что уменьшение продолжительности светодиодного освещения до 8 ч способствовало обогащению микрозелени гороха по сравнению с контролем на 35 % только свободными органическими кислотами, сопровождавшемуся ее обеднением на 3–54 % сухими, пектиновыми и дубильными веществами, аскорбиновой и гидроксикоричными кислотами, катехинами и флавонолами, общим протеином и альбуминами, а также растворимыми сахарами со снижением показателя сахарокислотного индекса на 30 %, тогда как сокращение времени освещения по сравнению с контролем до 10 ч усиливало накопление в ней на 4–88 % гидроксикоричных кислот, общего белка, альбуминов, флавонолов и растворимых сахаров при увеличении сахарокислотного индекса на 12 %, но при этом обуславливало снижение на 3–36 % содержания аскорбиновой кислоты, катехинов и дубильных веществ. Увеличение же продолжительности светодиодного освещения до 14 ч приводило к усилению накопления в микрозелени гороха относительно контроля на 2–27 % сухих веществ, гидроксикоричных кислот, общего белка, флавонолов и растворимых сахаров при увеличении показателя сахарокислотного индекса на 44 %, сопровождавшемуся ингибированием на 13–19 % биосинтеза только свободных органических кислот. При этом 16-часовая экспозиция способствовала обогащению микрозелени гороха на 3–41 % сухими и пектиновыми веществами, общим протеином и растворимыми сахарами при увеличении показателя сахарокислотного индекса на 103 % на фоне ее обеднения на 8–47 % аскорбиновой и свободными органическими кислотами, альбуминами, флавонолами и дубильными веществами.

На основании сравнения биохимических характеристик микрозелени гороха в рамках эксперимента была выявлена продолжительность светодиодного освещения, обусловившая наибольшие и соответственно наименьшие параметры накопления в ней исследуемых соединений разной химической природы (табл. 2). Отметим, что 8-часовая его продолжительность обеспечивала максимальное в эксперименте накопление титруемых кислот, 10-часовая – общего протеина, альбуминов, а также Р-витаминов за счет наиболее активного биосинтеза флавонолов, тогда как 12-часовая, принятая в качестве контроля, – аскорбиновой кислоты, катехинов и дубильных веществ. Применение 14-часовой продолжительности освещения способствовало наибольшему в эксперименте накоплению в микрозелени гороха гидроксикоричных кислот и сходному с контролем накоплению аскорбиновой кислоты и дубильных веществ, а также сходному с контролем и 16-часовой экспозицией накоплению катехинов при сопоставимом для 10-часовой экспозиции наиболее высоком общем содержании биофлавоноидов, тогда как использование 16-часовой продолжительности освещения обеспечивало максимальное в эксперименте содержание сухих и пектиновых

веществ, катехинов и растворимых сахаров при наиболее высоком показателе сахарокислотного индекса, свидетельствующем о наибольшей сладости производимой продукции.

Таблица 1

**Относительные различия с контролем вариантов опыта с разной продолжительностью светодиодного освещения по содержанию действующих веществ в сухом веществе микрозелени гороха овощного, %**

Table 1

**Relative differences with the control of the experiment variants with different duration of LED lighting on the content of active substances in the dry matter of micro-green peas, %**

Показатель	8 ч	10 ч	14 ч	16 ч
Сухие вещества	-7,9	-	+5,9	+16,8
Свободные органические кислоты	+35,4	-	-12,8	-30,4
Аскорбиновая кислота	-10,7	-26,2	-	-23,7
Гидроксикоричные кислоты	-16,1	+4,4	+12,1	-
Растворимые сахара	-5,4	+10,7	+25,1	+41,2
Сахарокислотный индекс	-30,2	+12,1	+43,6	+103,4
Пектиновые вещества	-9,3	-	-	+6,1
Общий белок	-3,2	+4,1	+1,7	+3,1
Альбумины	-12,7	+14,3	-	-46,8
Катехины	-20,5	-8,3	-	-
Флавонолы	-13,5	+10,6	+7,6	-12,4
Сумма биофлавоноидов	-14,9	+6,9	+6,6	-10,8
Дубильные вещества	-25,5	-35,9	-	-7,8

Примечание. Прочерк означает отсутствие статистически значимых по *t*-критерию Стьюдента различий с контролем при  $p < 0,05$ .

Наряду с этим были выявлены варианты опыта с минимальными значениями биохимических характеристик микрозелени гороха, характеризовавшиеся наибольшим их отставанием от контроля (см. табл. 1). Так, при 8-часовой продолжительности освещения установлены наименьшие в эксперименте значения большинства биохимических характеристик, тогда как при 10-часовой – только аскорбиновой кислоты и дубильных веществ, при 16-часовой – альбуминов, аскорбиновой и свободных органических кислот.

Таблица 2

**Продолжительность светодиодного освещения, обуславливающая наибольшее (max) и наименьшее (min) содержание органических соединений в сухом веществе микрозелени гороха овощного**

Table 2

**The duration of LED lighting, which determines the highest (max) and lowest (min) content of organic compounds in the dry matter of vegetable pea microgreens**

Показатель	8 ч	10 ч	12 ч	14 ч	16 ч
Сухие вещества	min				max
Свободные органические кислоты	max				min
Аскорбиновая кислота		min	max	max	min
Гидроксикоричные кислоты	min			max	
Растворимые сахара	min				max
Сахарокислотный индекс	min				max
Пектиновые вещества	min				max
Общий белок	min	max			
Альбумины		max			min
Катехины	min		max	max	max
Флавонолы	min	max			
Сумма биофлавоноидов	min	max		max	
Дубильные вещества		min	max	max	

Таким образом, что продолжительность светодиодного освещения оказывала существенное, причем неоднозначное влияние на темпы биосинтеза органических соединений в микрозелени гороха. С целью выявления продолжительности светодиодного освещения, обеспечившей наиболее высокий интегральный уровень питательной и витаминной ценности производимой продукции в соответствии с выбранным методическим подходом [19], для каждого тестируемого варианта опыта было осуществлено суммирование относительных размеров положительных и отрицательных расхождений с контролем по 13 количественным характеристикам биохимического состава образцов микрозелени гороха (табл. 3).

Таблица 3

**Относительные размеры, амплитуды и соотношения разноориентированных различий с контролем вариантов опыта с разной продолжительностью светодиодного освещения по биохимическим характеристикам микрозелени гороха овощного**

Table 3

**Relative sizes, amplitudes and ratios of differences with the control of experimental variants with different duration of LED lighting according to the biochemical characteristics of vegetable pea microgreens**

Продолжительность освещения	Относительные различия, %				
	положительное	отрицательное	амплитуда	положительное / отрицательное	совокупный эффект
8 ч	35,4	169,9	205,3	0,2	-134,5
10 ч	63,1	70,4	133,5	0,9	-7,3
14 ч	102,6	12,8	115,4	8,0	+89,8
16 ч	170,6	131,9	302,5	1,3	+38,7

Как видим, амплитуда выявленных отклонений тестируемых вариантов опыта от контроля по совокупности исследуемых признаков варьировалась в рамках эксперимента от 115,4 и 133,5 % при 14- и 10-часовом освещении до 302,5 % при 16-часовом, что свидетельствовало о разной степени влияния исследуемого фактора на качественный состав микрозелени гороха – наименьшей в двух первых случаях и наибольшей – в последнем. Весьма значительным, уступавшим установленному при 16-часовой экспозиции в 1,5 раза, оказалось влияние на ее биохимический состав также 8-часовой продолжительности освещения, оказавшей преимущественно негативное воздействие на интегральный уровень питательной и витаминной ценности микрозелени гороха. Об этом свидетельствовало почти 5-кратное превышение суммарных размеров отрицательных сдвигов в ее биохимическом составе над таковыми положительных, что указывало на существенное ухудшение качества продукции по сравнению с контролем, подтверждаемое также отрицательной величиной совокупного эффекта (см. табл. 3). При этом на фоне 10-часовой экспозиции все еще сохранялось, хотя и менее выраженное, чем при 8-часовой, но все же достоверное превышение в 1,1 раза размеров отрицательных отклонений от контроля над положительными, что указывало на некоторое ухудшение ее качественного состава по сравнению с 12-часовой экспозицией, подтверждаемое также незначительной отрицательной величиной совокупного эффекта.

Вместе с тем увеличение продолжительности светодиодного освещения до 14 и 16 ч оказывало весьма выразительное позитивное влияние на биохимический состав микрозелени гороха. Это подтверждалось в 8,0 и 1,3 раза более высоким, чем в контроле, интегральным уровнем питательной и витаминной ценности данной продукции, оцениваемым кратным размером превышения относительных размеров положительных сдвигов над таковыми отрицательных, а также положительными значениями совокупного эффекта. При этом наиболее успешным в этом плане следовало признать 14-часовую продолжительность освещения.

В соответствии со снижением кратного размера соотношения положительных и отрицательных сдвигов в биохимическом составе микрозелени гороха относительно контроля при разной продолжительности воздействия исследуемого фактора на опытные растения, тестируемые варианты опыта располагались следующим образом:

$$14 \text{ ч} > 16 \text{ ч} > 12 \text{ ч} > 10 \text{ ч} > 8 \text{ ч}.$$

Таким образом, лидирующее положение в эксперименте по интегральному уровню питательной и витаминной ценности микрозелени гороха, превосходившему таковой при 12-часовой продолжительности освещения в 8 раз, принадлежало варианту опыта с 14-часовым освещением. При этом вариант с 16-часовым освещением, превосходивший контрольный в 1,3 раза, уступал в этом плане лидирующему варианту опыта в 6,2 раза. Что касается вариантов опыта с 8- и 10-часовой продолжительностью освещения, то суммарная величина отрицательных отклонений биохимических характеристик от контроля в них почти в 4 и 1,1 раза превышала таковую положительных, что обусловило их отставание от более успешных вариантов опыта с 14- и 16 часовым освещением по интегральному уровню питательной и витаминной

ценности продукции в 40 и 6 соответственно, а также в 9 и 1,5 раза, что позволило считать их в этом плане неэффективными.

### Заключение

На основании сравнительного исследования в производственном эксперименте влияния продолжительности светодиодного освещения (8, 10, 12, 14, 16 ч) на 13 характеристик биохимического состава микрорезелени гороха овощного (сорт Павлуша) – содержание сухих, дубильных и пектиновых веществ, свободных органических, аскорбиновой и гидроксикоричных кислот, растворимых сахаров, общего протеина и альбуминов, основных групп биофлавоноидов и показатель сахарокислотного индекса установлено следующее. Наименее значительные изменения в биохимическом составе микрорезелени гороха относительно контроля (12-часовая экспозиция) выявлены при 10- и 14-часовой продолжительности освещения, тогда как наибольшие – при 8- и особенно при 16-часовой. При этом лидирующее положение по интегральному уровню питательной и витаминной ценности производимой продукции, превосходившему таковой в контроле в 8,3 раза, принадлежало варианту опыта с 14-часовым освещением при отставании от него варианта с 16-часовым освещением в 5,2 раза. При этом для вариантов с 8- и 10-часовой продолжительностью освещения показано отставание в этом плане от варианта с 14- часовым освещением соответственно в 42 и 12 раз, тогда как от варианта с 16-часовым освещением – в 8 и 2 раза, что позволило считать их неэффективными в обеспечении высокого качества микрорезелени гороха.

### Библиографические ссылки

1. Meng Q, Kelly N, Runkle ES. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. *Environmental and Experimental Botany*. 2019;162:383–391. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.03.016.
2. Анисимов АА. Влияние узкополосного красно-синего освещения на пигментный комплекс некоторых декоративных растений. В: *Перспективы развития АПК в работах молодых ученых: материалы региональной научно-практической конференции молодых учёных, Тюмень, 5 февраля 2014 г.* Тюмень: [б. и.]; 2014. с. 8–12.
3. Коновалова ИО, Беркович ЮА, Ерохин АН, и др. Оптимизация светодиодной системы освещения витаминной космической оранжереи. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2016;50(3):17–23.
4. Zhang X, Bian Z, Yuan X, Chen X. A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;99:1–15. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.02.031.
5. Andrei Z, Vasilache V, Pintilie O, Stoleru T. Blue and Red LED Illumination Improves Growth and Bioactive Compounds Contents in *Cyanic and Cyanic Ocimum basilicum* L. microgreens. *Molecules*. 2017;22(2111):1–14. DOI: 10.3390/molecules22122111.
6. Brazaitytė A, Vaštakaitė-Kairienė V, Viršilė A. Changes in mineral element content of microgreens cultivated under different lighting conditions in a greenhouse. *Acta Horticulturae*. 2018;1227:507–516. DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1227.64.
7. Brazaitytė A, et al. Comparison of LED and HPS illumination effects on cultivation of red pak choy microgreens under indoors and greenhouse conditions. *Acta Horticulturae*. 2020;1287:395–402.
8. Kong Y, Zheng Y. Growth and morphology responses to narrow-band blue light and its co action with low-level UVB or green light: A comparison with red light in four microgreen species. *Environmental and Experimental Botany*. 2020;178(104189):1–11. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2020.104189.
9. Craver JK, Gerovac J, Lopez R, Kopsell DA. Light Intensity and Light quality from Sole-source Light-emitting Diodes Impact Phytochemical Concentrations within Brassica Microgreens. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2017;142(1):3–12. DOI: 10.21273/JASHS03830-16.
10. Ермаков АИ, редактор. *Методы биохимического исследования растений*. Ленинград: [б. и.]; 1987.
11. Марсов НГ. *Фитохимическое изучение и биологическая активность брусники, клюквы и черники* [автореферат диссертации]. Пермь: [б. и.]; 2006. с. 99–101.
12. Кусакина МГ, Суворов ВИ, Чудинова ЛА. *Большой практикум «Биохимия». Лабораторные работы*. Пермь: [б. и.]; 2012.
13. Swain T, Hillis W. The phenolic constituents of *Prunus Domenstica*. 1. The quantitative analysis of phenolic constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1959;10(1):63–68. DOI: 10.1002/JSFA.2740100110.
14. Скорикова ЮГ, Шафтан ЭА. Методика определения антоцианов в плодах и ягодах. В: *Труды 3 Всесоюзного семинара по биологически активным (лечебным) веществам плодов и ягод*. Свердловск: [б. и.]; 1968. с. 451–461.
15. Андреева ВЮ и др. Методика определения антоцианов в плодах аронии черноплодной. *Фармация*. 2013;3:19–21.
16. Определение содержания дубильных веществ в лекарственном растительном сырье. В: *Государственная фармакопея СССР*. Москва: Медицина; 1987. Выпуск 1. с. 286–287.
17. Петров КП. *Метод формольного титрования со смешанными индикаторами*. Киев: Вища школа; 1978. с. 16–18.
18. Bradford MM. Rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Analytical Biochemistry*. 1976;8:248–254.
19. Рупасова ЖА, Решетников ВН, Яковлев АП. Патент ВУ 17648. *Способ ранжирования таксонов растения*. Опубл. 08.07.2013.

### References

1. Meng Q, Kelly N, Runkle ES. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. *Environmental and Experimental Botany*. 2019;162:383–391. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.03.016.
2. Anisimov AA. *Vliyaniye uzkoplosnogo krasno-sinego osveshcheniya na pigmentnyy kompleks nekotorykh dekorativnykh rasteniy* [The effect of narrow-band red-blue illumination on the pigment complex of some ornamental plants]. In: *Perspektivy razvitiya APK*

- v *rabotach molodykh ychenykh. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii molodykh ychenykh, Tyumen, 5 fevrala, 2014 g.* [Prospects for the development of the agro-industrial complex in the works of young scientists: materials of the regional scientific and practical conference of young scientists, Tyumen, 2014 February 5]. Tyumen: [publisher unknown]; 2014. p. 8–12. Russian.
3. Konovalova IO, Berkovich YA, Erochin AN, et al. Optimization of the LED lighting system of the vitamin space greenhouse. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya medicina* [Aerospace and environmental medicine]. 2016;50(3):17–23. Russian.
  4. Zhang X, Bian Z, Yuan X, Chen X. A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;99:1–15. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.02.031.
  5. Andrei Z, Vasilache V, Pintilie O, Stoleru T. Blue and Red LED Illumination Improves Growth and Bioactive Compounds Contents in Acyanic and Cyanic *Ocimum basilicum* L. microgreens. *Molecules*. 2017;22(2111):1–14. DOI: 10.3390/molecules22122111.
  6. Brazaitytė A, Vaštakaitė-Kairienė V, Viršilė A. Changes in mineral element content of microgreens cultivated under different lighting conditions in a greenhouse. *Acta Horticulturae*. 2018;1227:507–516. DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1227.64.
  7. Brazaitytė A, et al. Comparison of LED and HPS illumination effects on cultivation of red pak choi microgreens under indoors and greenhouse conditions. *Acta Horticulturae*. 2020;1287:395–402.
  8. Kong Y, Zheng Y. Growth and morphology responses to narrow-band blue light and its co action with low-level UVB or green light: A comparison with red light in four microgreen species. *Environmental and Experimental Botany*. 2020;178(104189):1–11. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2020.104189.
  9. Craver JK, Gerovac J, Lopez R, Kopsell DA. Light Intensity and Light quality from Sole-source Light-emitting Diodes Impact Phytochemical Concentrations within Brassica Microgreens. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2017;142(1):3–12. DOI: 10.21273/JASHS03830-16.
  10. Ermakov AI. *Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy* [Methods of biochemical research of plants]. Leningrad: [publisher unknown]; 1987. Russian.
  11. Marsov NG. *Fitokhimicheskoye izucheniye i biologicheskaya aktivnost' brusniki, klyukvy i cherniki* [Phytochemical study and biological activity of cranberries, cranberries and blueberries]. [PhD thesis]. Perm: [publisher unknown]; 2006. p. 99–101. Russian.
  12. Kusankina MG, Suvorov VI, Chudinova LA. *Bolshoy praktikum «Biokhimiya»*. *Laboratornyye raboty* [Big workshop «Biochemistry». Laboratory work]. Perm: [publisher unknown]; 2012. Russian.
  13. Swain T, Hillis W. The phenolic constituents of *Prunus* *Domenstica*. 1. The quantitative analysis of phenolic constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1959;10(1):63–68. DOI: 10.1002/JSFA.2740100110.
  14. Skorikova YG, Chaftan EA. *Metodika opredeleniya antotsianov v plodakh i yagodakh* [Method of determination of anthocyanins in fruits and berries]. In: Proceedings of the III All-Union seminar on biologically active (therapeutic) substances of fruits and berries. Sverdlovsk: [publisher unknown]; 1968. p. 451–461. Russian.
  15. Andreeva VY. The method of determining anthocyanins in the fruits of aronia *prunus*. *Pharmacy*. 2013;3:19–21. Russian.
  16. *Opredeleniye sodержaniya dubilnykh veshchestv v lekarstvennom rastitelnom syr'ye* [Determination of the content of tannins in medicinal plant raw materials]. In: State Pharmacopoeia of the USSR. Moscow: Medicina; 1987. Volume 1. p. 286–287. Russian.
  17. Petrov KP. *Metod formol'nogo titrovaniya so smeshannymi indikatorami* [The method of formal titration with mixed indicators]. Kiev: Vischa shkola; 1978. p. 16–18. Russian.
  18. Bradford MM. Rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Analytical Biochemistry*. 1976;8:248–254.
  19. Rupasova GA, Rechetnikov VN, Yakovlev AP. *Sposob ranzhirovaniya taksonov rasteniya* [Patent BY 17648. Method of ranking plant taxa. Published 2013 July 8]. Russian.

---

---

# РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

---

## RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

---

---

УДК 614.876

### ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ НАСЕЛЕНИЯ ПОСЛЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АВАРИИ

В. В. ДРОЗДОВИЧ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Отдел эпидемиологии рака и генетики Национального института здоровья,  
Медицинский центр, 9609, 20892-9778, г. Бетесд, США

Авария на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) в Украине 26 апреля 1986 г. привела к выбросу радиоактивных веществ в атмосферу, в частности йода-131 ( $^{131}\text{I}$ ), причем наибольшие выпадения этого радионуклида были в Беларуси, Украине и западной части России. Увеличение числа случаев рака щитовидной железы (ЩЖ) и других заболеваний ЩЖ среди облученного населения в этих странах стал основным медицинским последствием аварии на ЧАЭС. Поэтому большое внимание было уделено оценке доз облучения ЩЖ за счет поступления  $^{131}\text{I}$  с продуктами питания в течение двух месяцев после аварии. В данной статье рассматриваются как индивидуальные дозы облучения ЩЖ для лиц, включенных в радиационные эпидемиологические исследования, так и средние дозы облучения для населения пострадавших стран. Индивидуальные дозы облучения ЩЖ от  $^{131}\text{I}$  варьировали до 42 Гр и зависели от возраста человека, региона проживания на момент аварии и уровней потребления коровьего молока. Средние дозы облучения ЩЖ среди детей возраста 1 год достигли 0,75 Гр в наиболее загрязненной Гомельской обл. в Беларуси. Поступление  $^{131}\text{I}$  было основным путем облучения ЩЖ: его средний вклад в дозу облучения составил более 90 %. Помимо облучения от  $^{131}\text{I}$ , поступление короткоживущих изотопов йода ( $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ) и теллура ( $^{131\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ), внешнее облучение от гамма-излучающих радионуклидов, выпавших по поветхность почвы, и внутреннее облучения от  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  вносили вклад в дозу облучения ЩЖ, как правило, не более 10 %. Неопределенности, связанные с оценками доз, характеризуются в данной работе геометрическим стандартным

---

#### Образец цитирования:

Дроздович ВВ. Дозы облучения щитовидной железы населения после Чернобыльской аварии. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;1:46–55 (на англ.).  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-46-55>

#### For citation:

Drozdovitch VV. Thyroid doses of the population after the Chernobyl accident. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;1:46–55.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-46-55>

---

#### Автор:

Владимир Вячеславович Дроздович – кандидат технических наук, научный сотрудник.

#### Author:

Vladimir V. Drozdovitch, PhD (engineering); researcher.  
[drozdovv@mail.nih.gov](mailto:drozdovv@mail.nih.gov)

отклонением распределения индивидуальных стохастических доз, которое варьировалось в среднем от 1,6 для доз, основанных на измерениях активности  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ, до 2,6 для доз, рассчитанных с использованием дозиметрических моделей. С радиологической точки зрения,  $^{131}\text{I}$  был наиболее важным радионуклидом, воздействие которого привело к росту случаев рака ЩЖ среди населения, облученного после аварии на ЧАЭС.

**Ключевые слова:** Чернобыль; щитовидная железа; радиация; облучение;  $^{131}\text{I}$ .

## THYROID DOSES OF THE POPULATION AFTER THE CHERNOBYL ACCIDENT

V. V. DROZDOVITCH<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute,  
9609 Medical Center, Bethesda 20892-9778, USA*

The accident at the Chernobyl nuclear power plant (NPP) in Ukraine on 26 April 1986 resulted in a significant release of radioactivity to the atmosphere, particularly of Iodine-131 ( $^{131}\text{I}$ ), with the greatest contamination occurring in Belarus, Ukraine, and western part of Russia. Increase in thyroid cancer and other thyroid diseases incidence in exposed population in these countries was the main health consequence of Chernobyl accident. Therefore, much attention was paid to the thyroid doses, mainly due to the  $^{131}\text{I}$  intake with foodstuffs during two months after the accident. This paper reviews the thyroid doses received by the population of the affected countries, both individual doses for subjects of radiation epidemiological studies and average doses for the population. Individual thyroid doses due to  $^{131}\text{I}$  intake varied up to 42 Gy and depended on the age of the person, region of residence at the time of the accident and cow's milk consumption habits. The population-average thyroid doses among young children reached 0.75 Gy in the most contaminated area, Gomel Oblast, in Belarus. Intake of  $^{131}\text{I}$  was the main exposure pathway to the thyroid gland: its average contribution to the thyroid dose was more than 90 %. In addition to exposure from  $^{131}\text{I}$ , the intake of short-lived radioiodine ( $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ) and radiotellurium ( $^{131\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ) isotopes, external irradiation from gamma-emitting radionuclides deposited on the ground, and  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ingestion contributed to the thyroid doses, typically, not more than 10 %. Uncertainties associated with dose estimates, in terms of mean geometric standard deviation of individual stochastic doses, varied in range from 1.6 for doses based on individual-radiation measurements to 2.6 for 'modelled' doses. From a radiological point of view,  $^{131}\text{I}$  was the most important radionuclide that caused radiation exposure to the thyroid gland after the Chernobyl accident and an increase in the incidence of thyroid cancer and other thyroid diseases among the exposed population.

**Keywords:** Chernobyl; thyroid; radiation; exposure;  $^{131}\text{I}$ .

### Introduction

The Chernobyl accident led to widespread radioactive contamination in many countries of the northern hemisphere, particularly in Belarus, Ukraine, and the western part of Russia. The accident resulted in the release from the damaged reactor of a large amounts of radionuclides into the atmosphere, including the radiologically significant short-lived (SL)  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{133}\text{I}$  and longer-lived gamma-emitting radionuclides, including  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  [1].

The increase of thyroid cancer (TC) among persons who were exposed to Chernobyl fallout during childhood and adolescence were reported a few years after the accident in Belarus, Ukraine and Russia [2–4]. A number of radiation epidemiology studies suggested that an increased risk of TC and other thyroid diseases associated with the thyroid exposure to  $^{131}\text{I}$  [5–9]. The results of these and other studies carried out among the affected population [10–12] suggested also that an increase in the incidence of TC in individuals exposed in childhood and adolescence was the main health effect of the Chernobyl accident. The excess odds ratios (EOR) of radiation-related TC derived in these cohort and case–control studies were similar within the range of uncertainties and varied from  $1.36 \text{ Gy}^{-1}$  (95 % confidence interval (CI): 0.39–4.15) [8] to  $8.4 \text{ Gy}^{-1}$  (95 % CI: 4.1–17.3) [11]. An increased risk of TC, but not statistically significant, (EOR/Gy = 3.91, 95 % CI: –1.49, 65.7) has been reported in individuals exposed to Chernobyl fallout *in utero* [13].

Since the main health effect of the Chernobyl accident is an increase in the incidence of TC and other thyroid diseases, the greatest attention was paid to the assessment of thyroid doses. The main purpose of this paper is to summarize the results of reconstruction of the thyroid doses of the population exposed to the Chernobyl accident.

### Thyroid doses: general considerations

After the Chernobyl accident, the radiation absorbed dose to the thyroid gland for the members of the public resulted mainly by the  $^{131}\text{I}$  intake. In brief, the radionuclides, which were released into atmosphere during the accident, deposited on the ground surface and contaminated the pasture grass covering the ground. The grazing cows

ate the contaminated grass and fraction of the radioactivity was transferred to their milk. The consumption of fresh cow's milk contaminated with  $^{131}\text{I}$  was the main pathway of thyroid exposure while the inhalation of contaminated air playing a minor role. The radiation dose due to  $^{131}\text{I}$  intake is the highest for the thyroid gland as iodine accumulates in this organ. Thyroid doses in children are higher than that of adults is because of the smaller size of the thyroid in children. Since the half-life of  $^{131}\text{I}$  is 8.02 days, radiation exposure to the thyroid gland occurred during the first two months after the accident when the activity of  $^{131}\text{I}$  in the environment became negligible.

In addition, there were other contributions to the thyroid dose, which were typically quite small for most people, but relatively important for individuals with no or little milk consumption: (1) internal irradiation resulting from intake of SL radioiodine isotopes ( $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ , and  $^{135}\text{I}$ ) and radiotellurium isotopes ( $^{131\text{m}}\text{Te}$  and  $^{132}\text{Te}$ ); (2) external irradiation from gamma-emitting radionuclides deposited on the ground; and (3) ingestion of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$ .

There are two types of doses to the population:

– An individual dose for a specified person that considers (i) information on individual whereabouts and consumption history collected, typically, by means of personal interview and (ii) individual-based radiation measurements, if available; and

– A population-average dose for an unspecified individual that is estimated using generic values of dosimetry models.

Estimates of individual dose are required for radiation epidemiological studies while the population-average doses are used for the purposes of radiation protection by comparing of exposure levels in population groups of different ages living in different territories. Radiation thyroid doses are also classified as 'measurement' doses, which are estimated using individual-based radiation measurements, and 'modelled' doses, which are estimated using dosimetry models.

The following information was available to reconstruct radiation doses to the population in Belarus, Ukraine, and Russia:

– About 400,000 measurements of  $^{131}\text{I}$  thyroidal activity that were derived from gamma radiation using detectors placed against the neck (called 'direct thyroid measurements') made shortly after the accident among the population resided in contaminated areas [14–16]. The measurement results were used to assess individual thyroid doses from  $^{131}\text{I}$  intake.

– Deposition density of  $^{137}\text{Cs}$  measured in nearly every settlement in the contaminated areas [17].

– Deposition densities of  $^{131}\text{I}$  and other radionuclides, such as  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{141}\text{Ce}$  and  $^{144}\text{Ce}$ , measured in some settlements [18–20].

–  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  activity concentrations derived from measurements of total beta-activity in cow's milk [21; 22].

– Thyroid volume measurements carried out in the early 1990s by the Sasakawa Memorial Health Foundation [23–25].

## Thyroid doses from intake of $^{131}\text{I}$

### *Individual thyroid doses for the subjects of radiation epidemiological studies*

The most reliable individual thyroid doses were estimated based on the results of measurements of the  $^{131}\text{I}$  thyroid activity done between 26 April and 30 June 1986 in the most contaminated oblasts in Belarus, Ukraine and Russia. There are two cohort studies that used estimates of individual  $^{131}\text{I}$  thyroidal activity measured for all cohort members and evaluated the uncertainties in doses. These two thyroid screening cohorts consist of 11,732 and 13,204 individuals in Belarusian-American (BelAm) cohort and Ukrainian-American (UkrAm) cohort, respectively, selected from people who were 0–18 y old at the time of the Chernobyl accident [26]. The Belarusian-American cohort includes persons who resided at the time of the accident in Gomel and Mogilev Oblasts as well as in the city of Minsk; the Ukrainian-American cohort consists of residents of Chernihiv, Kyiv and Zhytomyr Oblasts the most contaminated regions in Belarus and Ukraine after the Chernobyl accident. Fig. 1 shows the scheme of the thyroid dose calculation for the cohort members.

In brief, the transfer of  $^{131}\text{I}$  from the ground deposition to the thyroid gland via the activity intake due to inhalation of air and ingestion of foodstuffs was evaluated by use of ecological and biokinetic models and personal interview data on individual residential history and consumption. For each cohort member, two thyroid doses were calculated: (i) a 'model-based' thyroid dose,  $D_{\text{models}}$ , based on the time-integrated  $^{131}\text{I}$  activity in the thyroid that was calculated using ecological and biokinetic models, and (2) a 'measurement-based' thyroid dose,  $D_{\text{meas}}$ , based on the calibration of model-based dose using the  $^{131}\text{I}$  thyroid activity measured at time  $t_m$  after the accident,  $Q_{\text{meas}}(t_m)$ . The measurement-based thyroid dose estimate is more reliable than the model-based dose estimate because it was based on the measured  $^{131}\text{I}$  thyroid activity.

Information on the person's whereabouts, consumption of fresh cows' milk, cows' milk products, and leafy vegetables as well as the administration of stable iodine necessary for the assessment of the individual thyroid doses was collected by means of personal interviews during two screening cycles in each cohort [27; 28]. Another

two screening thyroid cohorts consist of persons exposed *in utero*, 2,965 and 2,582 individuals in Belarus and Ukraine, respectively [29; 30]. A fraction of the cohorts' members, around 10 % in Belarus and 28 % in Ukraine, was subject to direct thyroid measurements [31; 32]. Essentially the same approach was used to calculate thyroid doses due to  $^{131}\text{I}$  intake for members of Belarusian-American and Ukrainian-American cohorts as well as for the Belarusian and Ukrainian *in utero* cohorts.

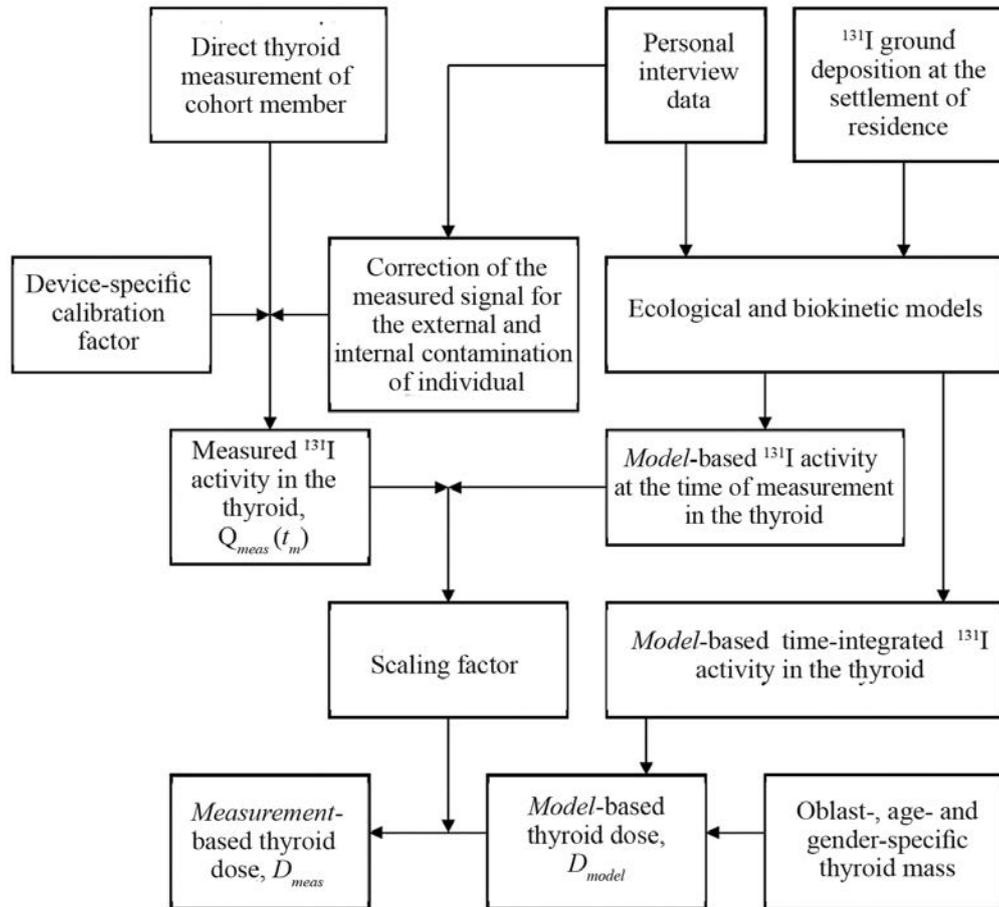


Fig. 1. Scheme of thyroid dose calculation for the cohort members

Table 1 shows the distribution of thyroid doses due to  $^{131}\text{I}$  intake in these four cohorts. More than 2/3 of the subjects of the Belarusian-American and Ukrainian-American cohorts received thyroid doses less than 0.5 Gray (Gy) and of the Belarusian and Ukrainian *in utero* cohorts received thyroid doses less than 0.05 Gy. Individual thyroid doses varied widely from essentially 0 to 39, 42, 15 and 2.7 Gy in the BelAm, UkrAm, Belarusian *in utero* and Ukrainian *in utero* cohorts, respectively (not shown).

Table 1

**Distribution (%) of subjects of the screening cohorts in Belarus and Ukraine according to the thyroid doses from  $^{131}\text{I}$  intake**

Thyroid dose (Gy)	Belarusian cohort <sup>a</sup> [33]	Ukrainian cohort <sup>a</sup> [28]	Belarusian <i>in utero</i> cohort <sup>b</sup> [31]	Ukrainian <i>in utero</i> cohort <sup>b</sup> [32]
<0.05	16.9	18.1	67.3	70.7
0.05–0.199	25.6	32.9	18.4	19.5
0.2–0.499	24.0	21.4	9.2	6.3
0.5–0.99	15.9	12.3	3.3	2.0
1.0–4.99	15.9	13.4	1.6	1.5
5–9.99	1.3	1.3	0.2	–
≥10	0.4	0.6	0.03	–

Note. <sup>a</sup>Distribution is shown for arithmetic mean of 1,000 individual stochastic doses, see below. <sup>b</sup>Prenatal thyroid dose.

In the Belarusian-American and Ukrainian-American studies the thyroid doses were calculated in a stochastic mode using a Monte-Carlo simulation procedure to provide an estimate of the uncertainties [28; 33]. In accordance with this procedure, 1,000 *individual stochastic* thyroid doses due to  $^{131}\text{I}$  intake were calculated with accounting to the sources of shared and unshared errors. Fig. 2 shows, as example, the general scheme of calculation of 1,000 sets of the Belarusian-American cohort doses and *individual stochastic* thyroid doses.

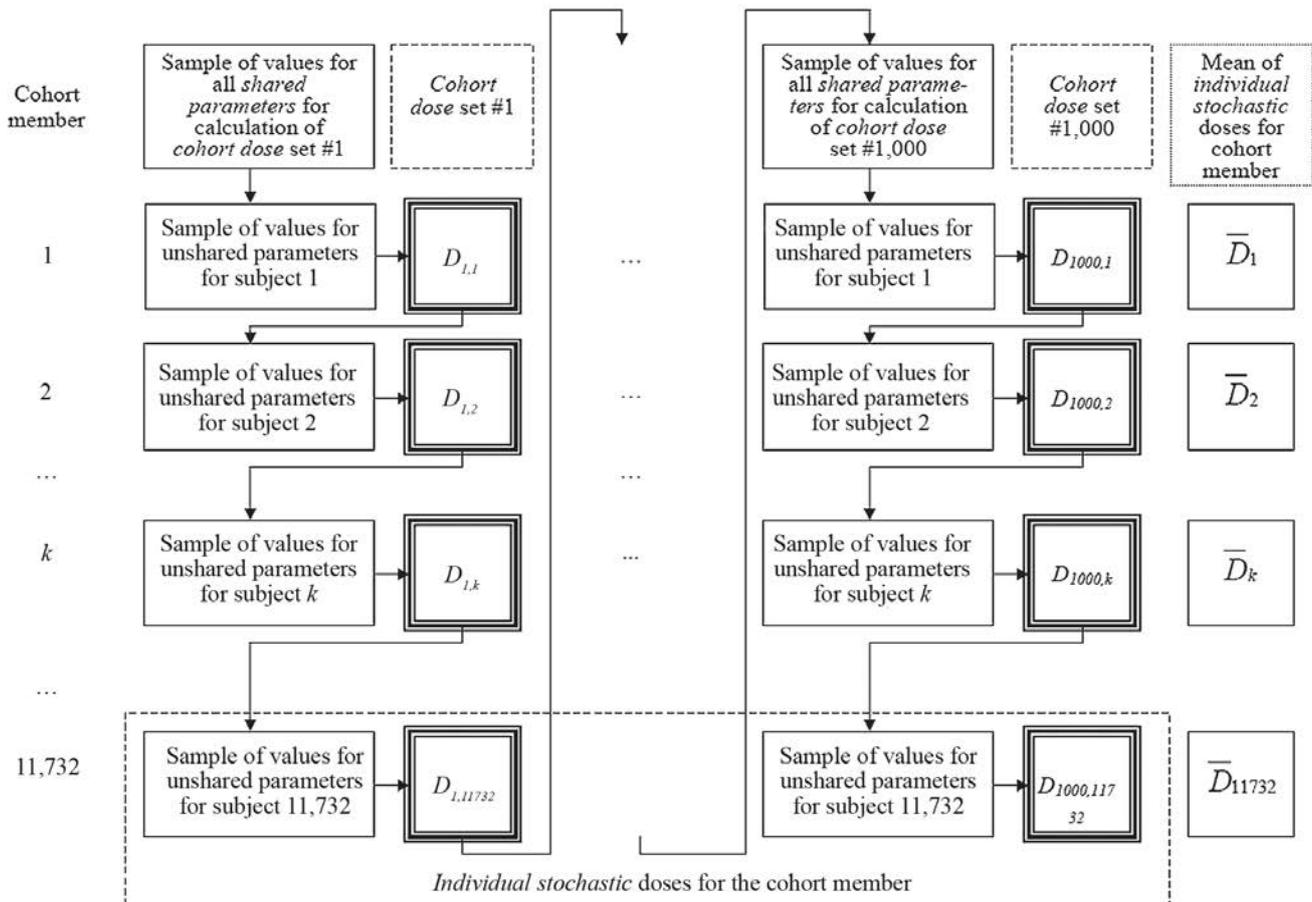


Fig. 2. General scheme of calculation of 1,000 sets of cohort doses considering shared and unshared errors [33]

At the beginning of the calculation of each dose set for the entire cohort, values for all shared parameters were assigned. The same value for each shared parameter was used to calculate one dose set for all cohort members for whom this parameter was shared, e. g.,  $^{131}\text{I}$  deposition density in the settlement was shared among all individuals who resided in that settlement. This step introduced correlations in each cohort dose set between individual dose estimates of the study subjects who shared parameters' values. In process of dose set simulation, values of unshared parameters for each cohort member were sampled from their distributions and calculated one dose realization for cohort member  $k$ ,  $D_{i,k}$ . Set of doses from  $D_{i,1}$  to  $D_{i,N}$  represents set number  $i$  of *cohort* thyroid doses for  $N$  cohort subjects. The thousand realizations of dose across the cohort dose sets for cohort member  $k$ , represent the *individual stochastic* thyroid doses of that cohort member.

The fitted distribution of 1,000 *individual stochastic* doses for cohort members was approximately log-normal and the geometric standard deviation (GSD) of this distribution was used to characterize the overall uncertainty. The GSDs of individual stochastic doses varied from 1.3 to 5.1 with an arithmetic mean of 1.8 and a geometric mean of 1.7 for the subjects of the Belarusian-American cohort, and from 1.3 to 10.6 with an arithmetic mean of 1.6 and a geometric mean of 1.5 for the subjects of the Ukrainian-American cohort. The uncertainties in thyroid doses were driven by sources of unshared classical errors associated with the derivation of  $^{131}\text{I}$  activity in the cohort member's thyroid from direct thyroid measurements and with the estimates of thyroid-mass values [28; 33].

If the result of measurement of  $^{131}\text{I}$  thyroïdal activity was not available for the individual, thyroid doses for the subjects of radiation epidemiological studies were estimated using two types of models:

- Purely empirical models based on the correlation between environmental contamination ( $^{137}\text{Cs}$  or  $^{131}\text{I}$  deposition density,  $^{131}\text{I}$  concentration in milk) and thyroid doses derived from direct thyroid measurements done among individuals of different ages (e. g., [15; 21; 34–36]); and

– The environmental transfer model considered the multi-compartment process of  $^{131}\text{I}$  activity transfer to the human thyroid either from  $^{131}\text{I}$  deposition leading to contamination of milk and leafy vegetables for ingestion or/ and from  $^{131}\text{I}$  concentration in ground-level air for inhalation (e. g., [37–39]).

To assess the individual modelled thyroid doses, a personal interview was conducted with study subjects or their relatives to collect information on the whereabouts and consumption history for a given person.

Table 2 presents, as example, the thyroid doses due to  $^{131}\text{I}$  by age and by country of residence among the subjects of the case-control study of TC in Gomel and Mogilev Oblasts in Belarus and Bryansk, Kaluga, Orel and Tula Oblasts in Russia, which was coordinated by International Agency for Research on Cancer (IARC). Data from the table show that the thyroid dose decreased with increasing age as thyroid mass decrease with increasing age. The mean thyroid dose for the study subjects from Russia was estimated to be more than five times lower than that for the subjects from Belarus, i. e., 0.10 Gy vs. 0.54 Gy. The GSDs of *individual stochastic* doses estimated in this study varied from 1.6 to 3.6 with an arithmetic and geometric means of 1.9 over all subjects.

Table 2

Thyroid doses due to  $^{131}\text{I}$  intake at different ages and by country of residence among subjects of the case-control study of TC in Belarus and Russia [40]

Age (y)	Thyroid dose <sup>a</sup> (Gy)	
	Belarus	Russia
<2	0.70	0.43
2–4.9	0.51	0.14
5–9.9	0.38	0.033
10–14.9	0.19	0.021
15–18	0.20	0.020

Note. <sup>a</sup>Arithmetic mean of 1,000 *individual stochastic* doses.

Fig. 3 shows the cumulative distribution of 1,000 sets of doses estimated in a case-control study of TC. Wide distribution (the range of medians across alternative dose realization was 0.063–0.22 Gy) indicates that the uncertainties in thyroid doses for the study subjects were driven by the shared (Berkson) errors associated with parameters of the dose reconstruction model [40].

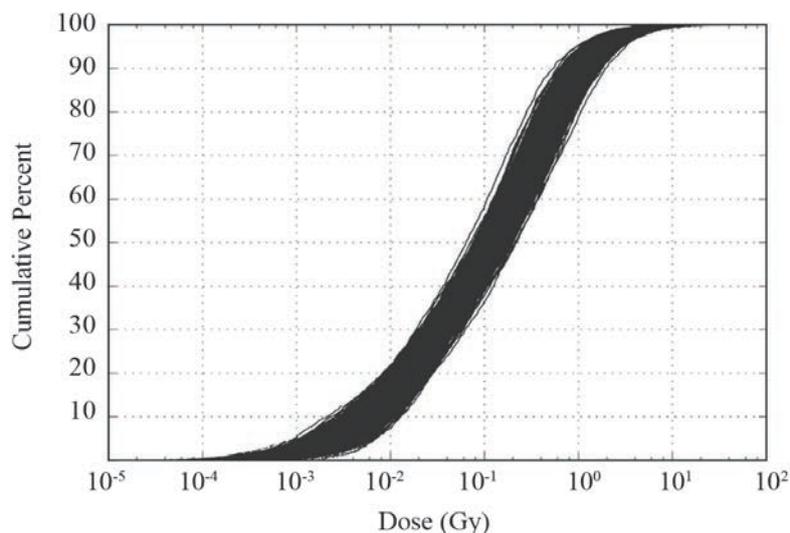


Fig. 3. Cumulative percentage of 1,000 sets of doses for a case-control study of TC [40]

Table 3 provides a summary of the thyroid doses from  $^{131}\text{I}$  intake estimated in in the post-Chernobyl radiation epidemiology studies conducted in Belarus, Ukraine, and Russia in which measurements of  $^{131}\text{I}$  thyroidal activity were not available for each study subject.

**Summary of the thyroid doses from <sup>131</sup>I intake estimated in the post-Chernobyl radiation epidemiology studies conducted in Belarus, Ukraine, and Russia**

Study	N of subjects	Thyroid dose from <sup>131</sup> I (Gy)			Reference
		Mean	Median	Range	
<b>Persons exposed <i>in utero</i><sup>a</sup></b>					
Belarusian <i>in utero</i> cohort study	2,965	0.13	0.017	0–15	[31]
Ukrainian <i>in utero</i> cohort study	2,582	0.087	0.017	0–2.7	[32]
Genomic study of TC in Belarus	157	0.13	0.032	0–4.5	[41]
<b>Persons exposed during childhood</b>					
Case-control study of TC in Belarus	321	0.30	0.11	0–4.3	[42]
IARC case-control study of TC <sup>b</sup>	1,695	0.54	0.29	3.0×10 <sup>-4</sup> –8.7	[40]
Case-control study of TC in Russia	198	–	0.044/0.016 <sup>c</sup>	0–2.7	[35]
The Chernobyl Tissue Bank <sup>d</sup>	1,869	0.24	–	1.0×10 <sup>-3</sup> –24	[43]
Genomic study of TC in Belarus	1,884	0.23	0.088	0–9.0	[41]

Note. <sup>a</sup>The sum of prenatal and postnatal thyroid doses. <sup>b</sup>The study participants from Belarus. <sup>c</sup>Cases/controls. <sup>d</sup>The study participants from Ukraine.

### **Population average dose estimates**

Thyroid doses from <sup>131</sup>I intake for population sub-groups were estimated using a combination of the methods indicated above. The following groups of population were considered [44; 45]: evacuees from the 30-km zone around Chernobyl NPP and residents of the contaminated areas in the most affected countries, Belarus, Ukraine, and Russia.

*Evacuees.* More than 100,000 persons were evacuated in the weeks after the accident from the most contaminated 30-km zone around Chernobyl NPP in Ukraine and Belarus. The thyroid doses varied with place of residence, date of evacuation, and the age of the evacuees. Evacuees from Belarusian villages received the highest doses, the average thyroid dose was estimated to be 0.68 Gy for adults and 3.1 Gy for young children (0–7 y) vs. 0.28 Gy and 1.2, respectively, for evacuees from Ukrainian villages [44]. The thyroid doses for the evacuees from the town of Pripyat were 0.28 Gy for adults and 0.99 Gy for young children received mainly due to the <sup>131</sup>I intake with cow’s milk during their stay in the villages where they were evacuated [46]. For the entire evacuated population, the population-weighted average thyroid dose was 0.47 Gy. It should be noted that thyroid doses were estimated based on direct thyroid measurements that were done among evacuated persons.

*Residents of the contaminated areas.* Table 4 gives the thyroid doses due to <sup>131</sup>I intake for the populations of Belarus, Ukraine, Russia and other European countries [1; 47].

Population-average thyroid doses depended on the dates of fallout and the levels of <sup>131</sup>I ground deposition, which varied from region to region, and on the dates when pasture grazing season started, since cow’s milk was the main source of <sup>131</sup>I intake to the exposed population. The highest oblast-average thyroid dose due to <sup>131</sup>I intake among the three countries was realized in the most contaminated Gomel Oblast in Belarus, it varied from 0.15 Gy for adults to 0.75 Gy for youngest children. The highest dose in Ukraine was found in Zhytomyr Oblast, 0.06 Gy for adults and 0.23 Gy for children 0–7 y old; and in Russia in Bryansk Oblast, 0.026 Gy for adults and 0.16 Gy for children 0–7 y.

### **Thyroid doses from pathways other than intake of <sup>131</sup>I**

Thyroid doses for most individuals were mainly defined by exposure from <sup>131</sup>I intake. Other exposure pathways were usually minor contributors to the thyroid dose: (1) intake of SL radionuclides, <sup>132</sup>I, <sup>133</sup>I, <sup>135</sup>I, <sup>131m</sup>Te, and <sup>132</sup>Te; (2) external irradiation from gamma-emitting radionuclides deposited on the ground, mainly <sup>132</sup>Te+<sup>132</sup>I, <sup>140</sup>Ba+<sup>140</sup>La, and <sup>95</sup>Zr+<sup>90</sup>Nb in the short term and <sup>137</sup>Cs in the long term; and (3) intake of <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs with locally produced foodstuffs. The methods, which were used to estimate thyroid doses from minor exposure pathways, are described elsewhere [42, 48–50]. Table 5 shows the contribution of minor exposure pathways to the individual thyroid doses for the subjects of epidemiological studies.

Table 4

Population average thyroid doses from <sup>131</sup>I intake in Belarus, Ukraine, Russia and other European countries [1; 47]

Country, oblast	Population	Thyroid dose (Gy) for	
		children 0–7 y	adults
<b>Belarus</b>			
– Brest Oblast	1,408,000	0.12 <sup>a</sup>	0.026
– Vitebsk Oblast	1,410,000	0.007 <sup>a</sup>	0.0020
– Gomel Oblast	1,651,000	0.75 <sup>a</sup>	0.15
– Grodno Oblast	1,154,000	0.028 <sup>a</sup>	0.0058
– Minsk Oblast	1,587,000	0.016 <sup>a</sup>	0.0047
– Minsk City	1,518,000	0.10 <sup>a</sup>	0.018
– Mogilev Oblast	1,280,000	0.13 <sup>a</sup>	0.031
<b>Ukraine</b>			
– Chernihiv Oblast	1,416,000	0.15	0.037
– Kyiv Oblast	1,685,000	0.20	0.053
– Kyiv City	2,565,000	0.094	0.024
– Zhytomyr Oblast	1,548,000	0.23	0.060
<b>Russia</b>			
– Bryansk Oblast	1,473,000	0.16	0.026
– Kaluga Oblasts	1,041,000	0.013	0.002
– Orel Oblasts	863,000	0.058	0.009
– Tula Oblasts	1,863,000	0.044	0.006
<b>Latvia</b>	2,667,000	0.0051 <sup>a</sup>	0.0015
<b>Lithuania</b>	3,684,000	0.023 <sup>a</sup>	0.0043
<b>Poland</b>	37,960,000	0.0078 <sup>a</sup>	8.0×10 <sup>-4</sup>
<b>Rest of Europe</b>	~440,000,000	8.0×10 <sup>-6</sup> – 0.021 <sup>a</sup>	2.0×10 <sup>-6</sup> – 0.0063

Note. <sup>a</sup>For 1-y age group according to [47].

Table 5

Mean contribution of minor exposure pathways to the individual thyroid dose among the subjects of epidemiological studies [31; 33; 50; 51]

Pathway	Mean contribution (%) of minor exposure pathways to the individual thyroid dose among the subjects of the study				
	Belarusian-American cohort [33]	Belarusian <i>in utero</i> cohort <sup>a</sup> [31]	Case-control study [50]	Case-control study [51]	
	Belarus	Belarus	Belarus	Belarus	Russia
Intake of SL radionuclides <sup>b</sup>	2.0	– <sup>c</sup>	2.0	1.6	0.7
External irradiation	4.5	3.6	1.8	3.4	6.3
<sup>137</sup> Cs ingestion	1.5	1.8	1.0	1.3	2.3
All minor exposure pathways	8.0	5.4	4.8	6.3	9.3

Note. <sup>a</sup>Prenatal thyroid dose. <sup>b</sup>SL radioiodine (<sup>132</sup>I, <sup>133</sup>I, <sup>135</sup>I) and radiotellurium (<sup>131m</sup>Te, <sup>132</sup>Te) isotopes. <sup>c</sup>Not considered.

The mean contribution of the minor pathways to the total thyroid dose varied from 5 to 8 % for subjects of the studies conducted in Belarus and was about 10 % for subjects in Russia. However, the contribution of minor pathways may be substantial for some individuals. For evacuees from Pripyat-town, the contribution of SL radionuclides (<sup>132</sup>I, <sup>133</sup>I, and <sup>132</sup>Te) was about 30 % of the total thyroid dose due to inhalation [52]. Another study estimated that for 19 out of 1,615 (1.3 % of the total) study participants, the contribution of prolonged sources

of exposure to the thyroid dose was higher than 50 % [51]. These individuals were relocated from contaminated residents shortly after the accident or did not consume locally produced foodstuffs and, therefore, received relatively small doses from  $^{131}\text{I}$  intake occurred during the first two months after the accident, but were exposed to high doses from external irradiation and  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ingestion in subsequent years.

## Conclusions

This paper considers the radiation exposure to the thyroid after the Chernobyl accident. The most important radiological consequence of the accident was exposure to  $^{131}\text{I}$ , which led to an increase in the rate of TC and other thyroid diseases in the exposed population. The thyroid doses were mainly defined by the consumption of  $^{131}\text{I}$ -contaminated cow's milk. Individual thyroid doses due to  $^{131}\text{I}$  intake varied up to 42 Gy and depended on the age of person, the region where people were exposed, and their cow's milk consumption habits. In addition to exposure from  $^{131}\text{I}$ , the intake of SL radionuclides, external irradiation from gamma-emitting radionuclides deposited on the ground, and  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ingestion contributed to the thyroid doses, typically, not more than 10 %.

## References

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2008 Report. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. New York: United Nations; 2011.
2. Kazakov VS, Demidchik EP, Astakhova LN. Thyroid cancer after Chernobyl. *Nature* 1992;359:21. DOI: 10.1038/359021a0.
3. Prisyazhiuk A, Pjatak OA, Buzanov VA, et al. Cancer in the Ukraine, post Chernobyl. *Lancet*. 1991;338:1334–1335. DOI: 10.1016/0140-6736(91)92632-c
4. Ivanov VK, Tsyb AF, Matveenko YG, et al. Radiation epidemiology of cancer- and non-cancer thyroid diseases in Russia after the ChNPP accident: Prognostication and risk estimation. *Radiat Risk*. 1995; 1:3–29.
5. Brenner AV, Tronko MD, Hatch M, et al. I-131 dose response for incident thyroid cancers in Ukraine related to the Chernobyl accident. *Environ Health Perspect* 2011; 119:933–939. DOI: 10.1289/ehp.1002674.
6. Cahoon EK, Nadirov EA, Polanskaya ON, et al. Risk of prevalent thyroid nodules in residents of Belarus exposed to Chernobyl fallout as children and adolescents. *Journal Clin Endocrinol Metab*. 2017; 102:2207–2221. DOI: 10.1210/jc.2016-3842.
7. Ostroumova E, Rozhko A, Hatch M, et al. Measures of thyroid function among Belarusian children and adolescents exposed to  $^{131}\text{I}$  from the accident at the Chernobyl nuclear plant. *Environ Health Perspect*. 2013; 121:865–871. DOI: 10.1289/ehp.1205783
8. Tronko M, Brenner A, Bogdanova T, et al. Thyroid neoplasia risk is increased nearly 30 years after the Chernobyl accident. *International Journal Cancer*. 2017;141:1585–1588. DOI: 10.1002/ijc.30857.
9. Zablotska LB, Ron E, Rozhko AV, et al. Thyroid cancer risk in Belarus among children and adolescents exposed to radioiodine after the Chernobyl Accident. *British Journal of Cancer* 2011; 104:181–187. DOI: 10.1038/sj.bjc.6605967.
10. Astakhova LN, Anspaugh LR, Beebe GW, et al. Chernobyl-related thyroid cancer in children of Belarus: a case-control study. *Radiat Research*. 1998; 150:349–356.
11. Cardis E, Kesminiene A, Ivanov V, et al. Risk of thyroid cancer after exposure to  $^{131}\text{I}$  in childhood. *Journal Natl Cancer Inst* 2005; 97:724–732. DOI: 10.1093/jnci/dji129.
12. Davis S, Stepanenko V, Rivkind N, et al. Risk of thyroid cancer in the Bryansk Oblast of the Russian Federation after the Chernobyl power station accident. *Radiat Research*. 2004; 162:241–248. DOI: 10.1667/rr3233
13. Hatch M, Brenner AV, Cahoon EK, et al. Thyroid cancer and benign nodules after exposure in utero to fallout from Chernobyl benign thyroid nodules. *Journal Clin Endocrinol Metab*. 2019; 104:41–48. DOI: 10.1210/jc.2018-00847.
14. Bratilova AA, Zvonova IA, Balonov MI, et al.  $^{131}\text{I}$  content in the human thyroid estimated from direct measurements of the inhabitants of Russian areas contaminated due to the Chernobyl accident. *Radiat Prot Dosim*. 2003;105:623–626. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006315.
15. Gavrilin YI, Khrouch VT, Shinkarev SM, et al. Chernobyl accident: Reconstruction of thyroid dose for inhabitants of the Republic of Belarus. *Health Phys*. 1999;76:105–119. DOI: 10.1097/00004032-199902000-00002.
16. Masiuk S, Chepurny M, Buderatska V, et al. Thyroid doses in Ukraine due to  $^{131}\text{I}$  intake after the Chernobyl accident. Report I: revision of direct thyroid measurements. *Radiat Environ Biophys*. 2021;60:267–288. DOI: 10.1007/s00411-021-00896-9.
17. European Commission. Atlas on  $^{137}\text{Cs}$  deposition on Europe after the Chernobyl accident. Brussels, Luxembourg: European Commission; 1998.
18. Drozdovitch V, Zhukova O, Germenchuk M, et al. Database of meteorological and radiation measurements made in Belarus during the first three months following the Chernobyl accident. *Journal Environ Radioact*. 2013;116:84–92. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.09.010.
19. Khrushchinskii AA, Kuten SA, Minenko VF, et al. Radionuclide ratios in precipitation on the territory of Belarus after the Chernobyl accident: Calculation from gamma-spectrometric measurements on soil in May–July 1986. *Atomic Energy*. 2014;117:143–148. DOI: 10.1007/s10512-014-9902-4.
20. Mück K, Pröhl G, Likhtarev I, et al. A consistent radionuclide vector after the Chernobyl accident. *Health Phys*. 2002;82:141–156. DOI: 10.1097/00004032-200202000-00002.
21. Drozdovitch V, Germenchuk M, Bouville A. Using total beta-activity measurements in milk to derive thyroid doses from Chernobyl fallout. *Radiat Prot Dosim*. 2006;118:402–411. DOI: 10.1093/rpd/nci360.
22. Minenko V, Viarenich K, Zhukova O, et al. Activity concentrations of  $^{131}\text{I}$  and other radionuclides in cow's milk in Belarus during the first month following the Chernobyl accident. *Journal Environ Radioact*. 2020;220–221:106264. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106264.
23. Ashizawa K, Shibata Y, Yamashita S, et al. Prevalence of goiter and urinary iodine excretion levels in children around Chernobyl. *Journal Clin Endocrinol Metab*. 1997;82:3430–3433. DOI: 10.1210/jcem.82.10.4285.

24. Likhtarov I, Kovgan L, Masiuk S, et al. Estimating thyroid masses for children, infants, and fetuses in Ukraine exposed to <sup>131</sup>I from the Chernobyl accident. *Health Phys.* 2013;104:78–86. DOI:10.1097/HP.0b013e31826e188e.
25. Skryabin AM, Drozdovitch V, Belsky Y, et al. Thyroid mass in children and adolescents living in the most exposed areas to Chernobyl fallout in Belarus. *Radiat Prot Dosim.* 2010;142:292–299. DOI: 10.1093/rpd/ncq209.
26. Stezhko VA, Buglova EE, Danilova LI, et al. A cohort study of thyroid cancer and other thyroid diseases following the Chernobyl accident: objectives, design, and methods. *Radiat Research.* 2004;161:481–492. DOI: 10.1667/3148.
27. Drozdovitch V, Minenko V, Khrouch V, et al. Thyroid dose estimates for a cohort of Belarusian children exposed to radiation from the Chernobyl accident. *Radiat Research.* 2013; 179:597–609. DOI: 10.1667/RR3153.1.
28. Likhtarov I, Kovgan L, Masiuk S, et al. Thyroid cancer study among Ukrainian children exposed to radiation after the Chernobyl accident: improved estimates of the thyroid doses to the cohort members. *Health Phys.* 2014;106:370–396. DOI: 10.1097/HP.0b013e31829f3096.
29. Hatch M, Brenner A, Bogdanova T, et al. A screening study of thyroid cancer and other thyroid diseases among individuals exposed in utero to Iodine-131 from Chernobyl fallout. *Journal Clin Endocrin Metab.* 2009;94:899–906. DOI: 10.1210/jc.2008-2049.
30. Yauseyenko V, Drozdovitch V, Ostroumova E, et al. Belarusian *in utero* cohort: new opportunity to evaluate health effects of prenatal and early-life exposure to ionizing radiation. *Journal Radiol Prot.* 2020;40:280–295. DOI: 10.1088/1361-6498/ab5c08.
31. Drozdovitch V, Minenko V, Kukhta T, et al. Thyroid dose estimates for a cohort of Belarusian persons exposed *in utero* and during early life to Chernobyl fallout. *Health Phys.* 2020;118:170–184. DOI: 10.1097/HP.0000000000001135.
32. Masiuk S, Chepurny M, Buderatska V, et al. Assessment of internal exposure to <sup>131</sup>I and short-lived radioiodine isotopes and associated uncertainties in the Ukrainian *in utero* cohort. *Journal Radiat Research.* (submitted).
33. Drozdovitch V, Minenko V, Golovanov I, et al. Thyroid dose estimates for a cohort of Belarusian children exposed to <sup>131</sup>I from the Chernobyl accident: Assessment of uncertainties. *Radiat Research.* 2015;184:203–218. DOI: 10.1667/rr13791.1.
34. Masiuk S, Chepurny M, Buderatska V, et al. Thyroid doses in Ukraine due to <sup>131</sup>I intake after the Chernobyl accident. Report II: dose estimates for the Ukrainian population. *Radiat Environ Biophys.* 2021;60:591–609. DOI: 10.1007/s00411-021-00930-w.
35. Stepanenko VF, Voilleque PG, Gavrillin YI, et al. Estimating individual thyroid doses for a case-control study of childhood thyroid cancer in Bryansk Oblast, Russia. *Radiat Prot Dosim.* 2004;108:143–160. DOI: 10.1093/rpd/nch017.
36. Zvonova IA, Balonov MI, Bratilova AA. Thyroid dose reconstruction for the population of Russia after the Chernobyl accident. *Radiat Prot Dosim.* 1998;79:175–178. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a032386.
37. Drozdovitch VV, Goulko GM, Minenko VF, et al. Thyroid dose reconstruction for the population of Belarus after the Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys.* 1997;36:17–23. DOI: 10.1007/s004110050050.
38. Kruk JE, Pröhl G, Kenigsberg JI. A radioecological model for thyroid dose reconstruction of the Belarus population following the Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys.* 2004;43:101–110. DOI: 10.1007/s00411-004-0241-z.
39. Vlasov OK, Pitkevich VA. Agro-climate model for estimation of radionuclides transport on food chain and for formation of internal exposure to population. *Radiat Risk.* 1999;11:65–85. Russian.
40. Drozdovitch V, Kesminiene A, Moissonnier M, et al. Uncertainties in radiation doses for a case-control study of thyroid cancer among persons exposed in childhood to Iodine-131 from Chernobyl fallout. *Health Phys.* 2020;119:222–235. DOI: 10.1097/HP.0000000000001206.
41. Drozdovitch V, Minenko V, Kukhta T, et al. Thyroid dose estimates for the genome-wide association study of thyroid cancer in persons exposed to <sup>131</sup>I after the Chernobyl accident. *Journal Radiat Research.* 2021;62:982–998. DOI: 10.1093/jrr/rrab082.
42. Gavrillin Y, Khrouch V, Shinkarev S, et al. Individual thyroid dose estimation for a case-control study of Chernobyl-related thyroid cancer among children of Belarus. Part I: <sup>131</sup>I, short-lived radioiodines (<sup>132</sup>I, <sup>133</sup>I, <sup>135</sup>I), and short-lived radiotelluriums (<sup>131m</sup>Te and <sup>132</sup>Te). *Health Phys.* 2004;86:565–585. DOI: 10.1097/00004032-200406000-00002.
43. Likhtarov I, Thomas G, Kovgan L, et al. Reconstruction of individual thyroid doses to the Ukrainian subjects enrolled in the Chernobyl Tissue Bank. *Radiat Prot Dosim.* 2013;156:407–423. DOI: 10.1093/rpd/nct096.
44. Bouville A, Likhtarev I, Kovgan L, et al. Radiation dosimetry for highly contaminated Ukrainian, Belarusian and Russian populations, and for less contaminated populations in Europe. *Health Phys.* 2007;93:487–501. DOI: 10.1097/01.HP.0000279019.23900.62.
45. Cardis E, Howe G, Ron E, et al. Cancer consequences of the Chernobyl accident: 20 years after. *Journal Radiol Prot.* 2006;26:127–140. DOI: 10.1088/0952-4746/26/2/001.
46. Goulko GM, Chumak VV, Chepurny NI, et al. Estimation of <sup>131</sup>I thyroid doses for the evacuees from Pripjat. *Radiat Environ Biophys.* 1996;35:81–87.
47. Drozdovitch V, Bouville A, Chobanova N, et al. Radiation exposure to the population of Europe following the Chernobyl accident. *Radiat Prot Dosim.* 2007;123:515–528. DOI: 10.1093/rpd/ncl528.
48. Likhtarev IA, Kovgan LN, Vavilov ES, et al. Internal exposure from ingestion of foods contaminated by <sup>137</sup>Cs after the Chernobyl accident. Report II. Ingestion doses of the rural population of Ukraine up to 12 y after the accident (1986–1997). *Health Phys.* 2000;79:341–357. DOI: 10.1097/00004032-200010000-00002.
49. Likhtarev IA, Kovgan LN, Jacob P, et al. Chernobyl accident: retrospective and prospective estimates of external dose of the population of Ukraine. *Health Phys.* 2002;82:290–303. DOI: 10.1097/00004032-200203000-00002.
50. Minenko VF, Ulanovsky A, Drozdovitch V, et al. Individual thyroid dose estimates for a case-control study of Chernobyl-related thyroid cancer among children of Belarus. Part II. Contributions from long-lived radionuclides and external radiation. *Health Phys* 2006; 90:312–327. DOI: 10.1097/01.HP.0000183761.30158.c1
51. Drozdovitch V, Khrouch V, Maceika E, et al. Reconstruction of radiation doses in a case-control study of thyroid cancer following the Chernobyl accident. *Health Phys.* 2010;99:1–16. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181e910dd.
52. Balonov M, Kaidanovsky G, Zvonova I, et al. Contributions of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early *in vivo* measurements. *Radiat Prot Dosim.* 2003;105:593–599. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006309.

УДК 611.411:614.871:621.039.58(476)

## РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В РЕЗУЛЬТАТЕ КАТАСТРОФЫ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

М. Г. ГЕРМЕНЧУК<sup>1)</sup>, В. В. ЖУРАВКОВ<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 представлены концептуальные подходы по ретроспективной оценке и моделированию радиоактивного загрязнения территории Республики Беларусь в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Работа выполнялась в рамках выполнения задания 3.01 «Исследование влияния ионизирующего излучения в широком диапазоне доз и при вариабельности характеристик излучения на разных уровнях организации живого организма» НИР «Оценить дозовые нагрузки и эффекты ионизирующих излучений в сочетании со стрессом различной природы на биоту в зоне хронического радиационного воздействия», ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» подпрограммы «Радиация и биологические системы» на 2021–2025 годы.

В результате выполнения работы был определен радионуклидный состав (для оценки последствий поступления радионуклидов в окружающую среду для биоты) и уровни радиоактивного загрязнения компонентов экосистемы в зоне наблюдения Гомельской, Витебской и Гродненской областей Республики Беларусь. Радиационная обстановка рассматривалась на разных временных этапах: в результате испытания ядерного оружия и после аварийного выброса на ЧАЭС [1; 2].

В настоящее время, по нашим данным, в зоне наблюдения Гомельской, Витебской и Гродненской областей Республики Беларусь радиационная обстановка обусловлена радионуклидами <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr. Значительно возрастает миграция <sup>90</sup>Sr в почве и по пищевой цепочке в результате деструкции топливных частиц и, как следствие, <sup>90</sup>Sr попадает в почвенные растворы, после чего мигрирует вглубь почвы.

Кроме того, в Гомельской обл. происходит накопление <sup>241</sup>Am за счет распада <sup>241</sup>Pu. Максимальный уровень загрязнения <sup>241</sup>Am установится к 2060 г. и превысит <sup>239+240</sup>Pu в 2,7 раза, при этом территории с уровнем загрязнения <sup>238+239+240</sup>Pu + <sup>241</sup>Am до 1000 Бк/м<sup>2</sup>, возможно, выйдут за пределы 30-километровой зоны.

Полученные результаты по выявлению наиболее значимых радионуклидов в зоне наблюдения Гомельской, Витебской и Гродненской областей Республики Беларусь и определяемые ими уровни радиоактивного загрязнения компонентов экосистемы Беларуси будут использованы для оценки последствий поступления радионуклидов в окружающую среду для биоты и прогнозирования развития радиоэкологической ситуации на рассматриваемых территориях, что важно для практического использования в организациях, принимающих организационные решения. Результаты научных исследований внедрены в учебный процесс в рамках лекционных и практических занятий на факультете мониторинга окружающей среды Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета.

**Ключевые слова:** окружающая среда; радиоактивное загрязнение; топливные частицы; миграция радионуклидов.

### Образец цитирования:

Герменчук МГ, Журавков ВВ. Ретроспективная оценка и моделирование радиоактивного загрязнения территории Республики Беларусь в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;1:56–67 (на англ.).  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-56-67>

### For citation:

Germenchuk MG, Zhuravkov VV. Retrospective assessment and modeling of radioactive contamination of the territory of the Republic of Belarus as a result of the disaster at the Chernobyl NPP. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;1:56–67.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-56-67>

### Авторы:

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

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

### Authors:

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

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

**Vladzislav V. Zhuravkov**, PhD (biology), docent; head of the department of information technologies in ecology and medicine.  
[zhuravkov@iseu.by](mailto:zhuravkov@iseu.by)

## RETROSPECTIVE ASSESSMENT AND MODELING OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF BELARUS AS A RESULT OF THE DISASTER AT THE CHERNOBYL NPP

M. G. GERMENCHUK<sup>a</sup>, V. V. ZHURAVKOV<sup>a</sup>

<sup>a</sup>International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,  
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus  
Corresponding author: M. G. Germenchuk (margermen@gmail.com)

The article presents conceptual approaches to retrospective assessment and predictive modeling of radioactive contamination of the territory of the Republic of Belarus as a result of the Chernobyl accident. The work was carried out within the framework of project 3.01 «Investigation of the effect of ionizing radiation in a wide range of doses and with the variability of radiation characteristics at different levels of organization of a living organism», GPNI «Natural resources and the environment» of the subprogram «Radiation and biological systems» for 2021–2025.

We determined the most significant radionuclide composition (for assessing the consequences of the release of radionuclides into the environment for biota) and the levels of radioactive contamination of ecosystem components in the observation zone of the Gomel, Vitebsk and Grodno regions of the Republic of Belarus. The radiation situation was considered at different time stages, namely as a result of atmospheric nuclear weapons testing and after an emergency release at the Chernobyl nuclear power plant [1; 2]. At present time, according to our data, in the observation zone of the Gomel, Vitebsk and Grodno regions of the Republic of Belarus, the radiation situation is caused by <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr radionuclides. The migration of <sup>90</sup>Sr in the soil and through the food chain significantly increases as a result of the destruction of fuel particles and, as a consequence, <sup>90</sup>Sr enters the soil solutions, after which it migrates deep into the soil. In addition, in the Gomel region, <sup>241</sup>Am accumulates due to the decay of <sup>241</sup>Pu. The maximum contamination level of <sup>241</sup>Am will be established by 2060 and will exceed <sup>239+240</sup>Pu by a factor of 2.7, while territories with a contamination level of <sup>238+239+240</sup>Pu + <sup>241</sup>Am up to 1000 Bq / m<sup>2</sup> may possibly go outside the 30-km zone. The results of scientific research were introduced into the educational process within the framework of lectures and practical classes at the Faculty of Environmental Monitoring of the International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University.

**Keywords:** environment; radioactive contamination; fuel particles; migration of radionuclides.

### Introduction

The radionuclide composition and the levels of radioactive contamination of ecosystem components of Belarus at different time stages after radionuclide release into the environment mainly determine the priorities in applied radioecological and radio biological research, the tasks of radiation protection of the population [3]. The paper generalizes the results of long term experimental observations of radionuclide composition dynamics, the levels of radioactive contamination of air and soil as a result of nuclear weapons test and after the Chernobyl NPP emergency release.

### Research materials and methods

The main levels of soil radioactive contamination as a result of global fallouts on the territory of the Republic of Belarus were formed in the mid 70's after conducting of intensive nuclear test in the atmosphere before the ratification of the Moscow agreement on the Prohibition of Nuclear Weapons Test (1963–1964) when annual fallout density of plutonium reached maximum figures: 10–15 Бк. In this period, <sup>239+240</sup>Pu concentration in air reached several dozens of μBq/m<sup>3</sup>. It led to an increased inhalation intake of transuranic elements into the body of the citizens of Europe and the Republic of Belarus as well, <sup>239+240</sup>Pu level in the body was about 7 Bq by the time of the accident at the Chernobyl NPP [4–6].

The concentration of <sup>137</sup>Cs increased from 4.0 μBq/m<sup>3</sup> to 130 μBq/m<sup>3</sup> in the northwest of Belarus in May, 1981. As it concerns <sup>239+240</sup>Pu, the rise was from 57 nBq/m<sup>3</sup> to 2300 nBq/m<sup>3</sup>. This strong increase in activity in May was the result of stratospheric fallout from the last 26<sup>th</sup> China's land-based nuclear test held in October, 1980. Maximum content of <sup>239+240</sup>Pu and <sup>137</sup>Cs was observed in the middle of May at 3500 nBq/m<sup>3</sup> and 220 μBq/m<sup>3</sup> correspondingly.

An increase in activity ratio of <sup>137</sup>Cs to <sup>239+240</sup>Pu from long term patterns can be noted. The average of this ratio was 63 in 1980 compared to 150 in 1985. Such a difference can be explained that in a nuclear explosion cesium is primarily bound to fine aerosols in the air with the diameter lower 0,1 μm what causes their high volatility. While plutonium can exist in a different, less volatile form consisting of oxides after high temperature annealing [4].

At the beginning of April, 1986, the concentration of radionuclides in surface air according to our experimental data was [6]: <sup>137</sup>Cs – 0,36 μBq/m<sup>3</sup>, <sup>239+240</sup>Pu – 4,7 nBq/m<sup>3</sup>, <sup>238</sup>Pu – 0,13 nBq/m<sup>3</sup>, <sup>90</sup>Sr – 220 nBq/m<sup>3</sup>, surface soil contamination: <sup>137</sup>Cs – 1900 Bq/m<sup>2</sup>, <sup>239+240</sup>Pu – 55 Bq/m<sup>2</sup>, <sup>238</sup>Pu – 1.5 Bq/m<sup>2</sup>, <sup>90</sup>Sr – 1200 Bq/m<sup>2</sup>. For global fallouts in April, 1986, the ratio in activity of the most significant actinides according to our experimental data was: <sup>238</sup>Pu/<sup>239</sup>Pu/<sup>240</sup>Pu/<sup>241</sup>Pu/<sup>241</sup>Am = 0.043/1,0/0,57/20/0,5 [4].

Radioactive release spread for large distances and contaminated a lot of European territory as a result of the Chernobyl accident. The territory of more than 200000 km<sup>2</sup> was contaminated with radioactive <sup>137</sup>Cs more than 0,04 MBq/m<sup>2</sup> [7].

The study of the spatial distribution of radioactive contamination of the European territory shows that the spread of radioactive substances had both a global, and a local, regional character. The atmospheric radioactive fallout was determined by the synoptic situation and meteorological conditions for the period April 26, – May 6, 1986, as it is shown in Fig. 1 [7].

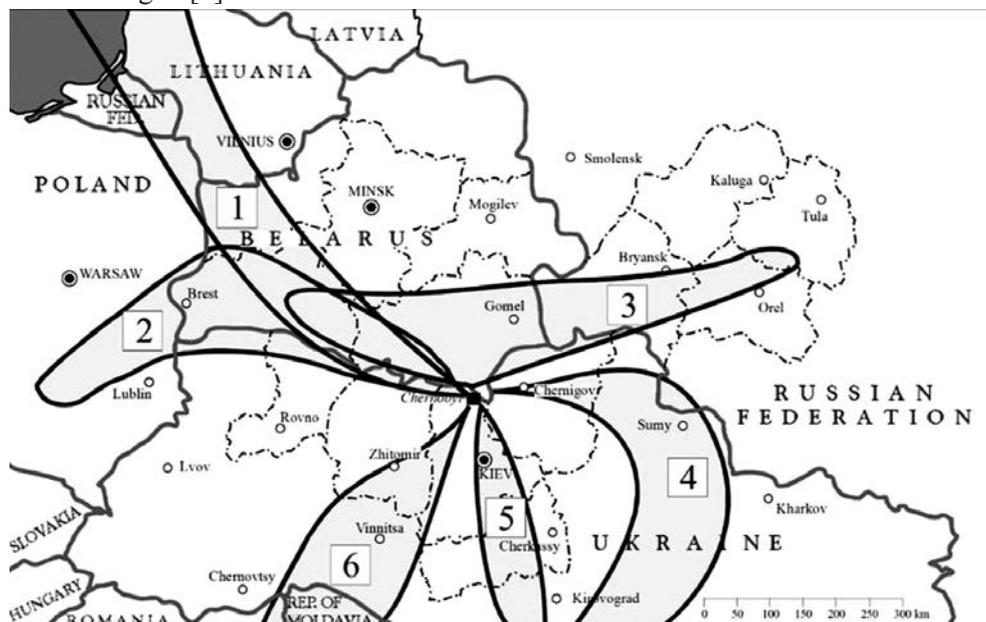


Fig. 1. Scheme of radioactive trace formation according to meteorological conditions for instant release on the following dates and time 1) April 26, 1986, 00:00; 2) April 27, 00:00; 3) April 27, 12:00; 4) April 29, 00:00; 5) May 2, 00:00; and 6) May 4, 12:00

In the dynamics of contamination of the territory of the Republic of Belarus by radionuclides released into the environment as a result of the accident at the Chernobyl NPP, the following stages can be distinguished: «The active stage of the accident or the iodine-neptunium phase»; «The stabilization of radiation condition»; «Cesium-strontium phase»; «Actinide phase».

The forecast of soil radioactive contamination at the defining point Masany, Hoiniki district, Gomel region (12 km north of the Chernobyl NPP IV block) based on the experimental data shown in Fig. 2. A former locality Masany was chosen as the defining point due to the fact that the radioactive contamination covered this area soon after the explosion and the radionuclide composition of soil contamination fully reflected time-aggregated radionuclide composition of an accidental release.

The forecast of radioactive contamination on the example of the defining point Masany allows finding out and describing the main dynamics stages of radioactive situation in the environment after the Chernobyl disaster for up to 1,000 years or more.

## Results and discussion

*The active stage of the accident or the iodine-neptunium phase.* The duration is about a month after the release. At this stage there was more intensive fall out on soil that formed observed levels of surface soil contamination with radionuclides of the Chernobyl origin. Significant changes in isotope ratio <sup>238</sup>Pu и <sup>239+240</sup>Pu also occurred here. Activity ratio <sup>238</sup>Pu/<sup>239+240</sup>Pu increased from 0.03 to 0.4–0.5, <sup>137</sup>Cs/<sup>239+240</sup>Pu from 100 to 105 [4]. At this stage there was more inhalation intake of actinides into the body of the citizens of the Republic of Belarus, the level of «the Chernobyl» <sup>238+239+240</sup>Pu in the body of Gomel region citizens evaluated 15 Bq [6]. The short-lived isotopes, determined radiation situation in the first days after the accident, were in the form of condensing and fuel particles. The condensing particles include radioactive isotopes <sup>132</sup>Te, <sup>134</sup>Cs, <sup>136</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>103</sup>Ru and <sup>106</sup>Ru. <sup>239</sup>Np, <sup>95</sup>Zr, <sup>95</sup>Nb, <sup>140</sup>Ba, <sup>140</sup>La, <sup>144</sup>Ce, etc., were part of fuel particles. The ratio of these radionuclides is significantly determined by the burn up depth of nuclear fuel at the NPP reactor which determines the amount of isotopes and their ratio in the irradiated fuel [8; 9]. The method of irradiated <sup>236</sup>U fuel use as a tracer was specially developed for the determination of a depth burn up and the amount of uranium fuel in the soil after the accident at Chernobyl NPP [10]. It is based on the calculated correlations between uranium isotopes in the core of the RBMK-1000 reactor depending on the depth of fuel burn up and experimental data on the ratio in the samples of radioactive isotope soil and technogenic release of <sup>235</sup>U, <sup>236</sup>U, <sup>238</sup>U. Average fuel burn up is (9.4 ± 0.5) MW\*day/kgU [8–10]. Therefore this average value was adopted for work on isotope ratio calculation [11–13].

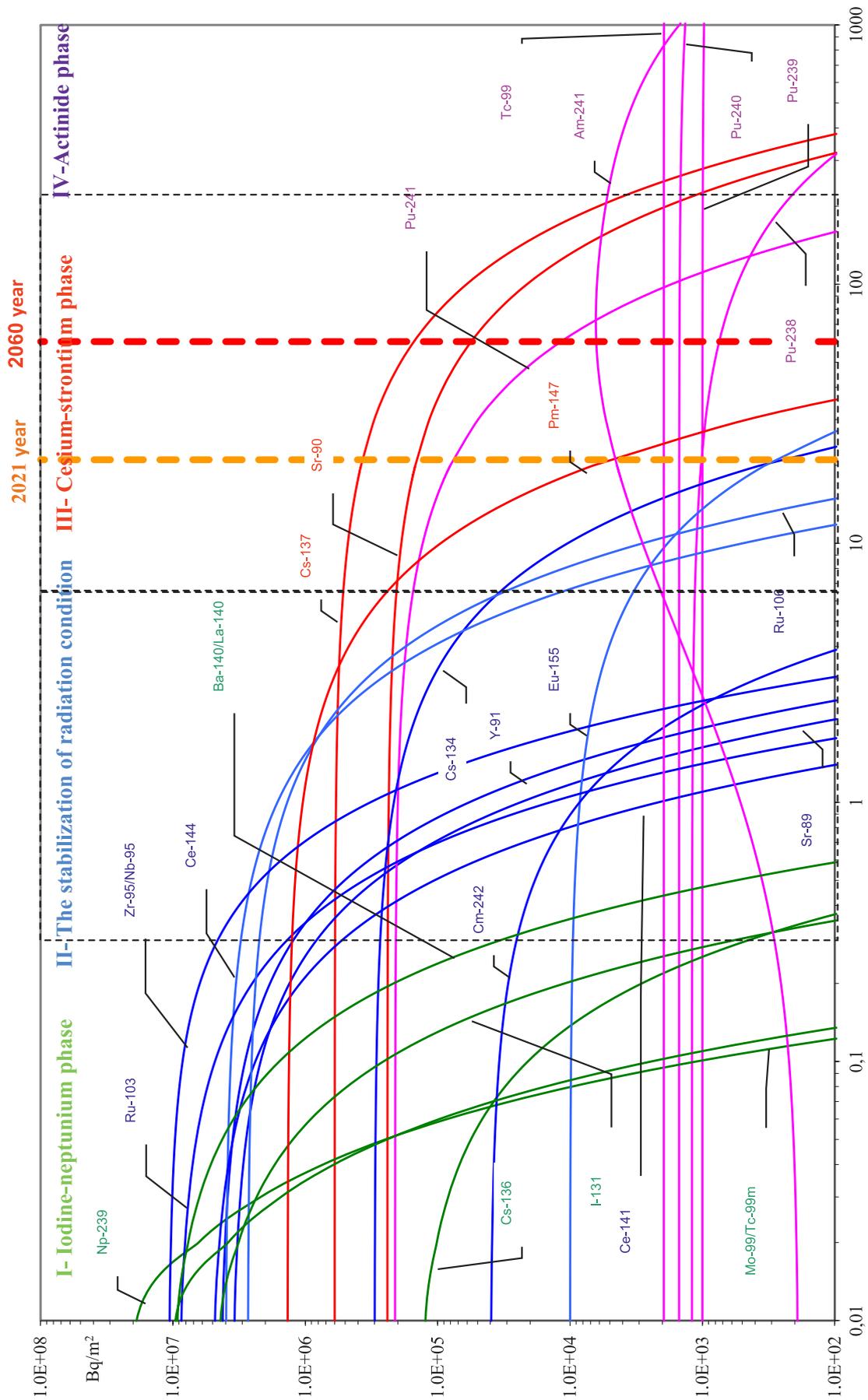


Fig. 2. The forecast of soil radioactive contamination at the defining point Masany based on the experimental data of radionuclide fraction coefficients

When calculation of fallout of radioactive isotopes  $^{140}\text{La}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{97}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{156}\text{Eu}$ ,  $^{239}\text{Np}$ ,  $^{143}\text{Ce}$ , their ratio to  $^{144}\text{Ce}$  was considered as these radionuclides were in the composition of fuel particles [9; 10]. It was also supposed that there wasn't  $^{137}\text{Cs}$  с  $^{99}\text{Mo}$  and  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  radionuclides fractionation as well as the radionuclides of iodine and tellurium. Their isotope ratio hadn't changed and was determined by the burn up depth of nuclear fuel at the NPP reactor which determines the amount of isotopes and their ratio in the irradiated fuel [10]. The tables 1 and 2 show the contamination reconstruction data of surface air and soil with iodine isotopes and short-lived radionuclide for Minsk and Gomel, and capacity levels of exposure dose during radioactive cloud pass [14; 15].

Table 1

Radionuclides characterizing the radiation situation in Minsk 1986 April 28–29

Radionuclide	$C_{RN-a}$ , kBq/m <sup>3</sup>	$\sigma_{RN-s}$ , kBq/m <sup>2</sup>	$P_{\gamma a}$ , $\mu\text{R}/\text{hour}$ (28.04.86)	$P_{\gamma a}/\sum P_{\gamma a}$ , %	$P_{\gamma s}$ , $\mu\text{R}/\text{hour}$ (29.04.86)	$P_{\gamma s}/\sum P_{\gamma s}$ , %
$^{131}\text{I}$	2.10	24.0	17.85	9.70	5.28	6.08
$^{132}\text{Te}$ ( $^{132}\text{I}$ )	2.03	23.2	103	56.0	28.8	33.1
$^{133}\text{I}$	0.51	5.78	6.67	3.63	1.85	2.13
$^{135}\text{I}$ ( $^{135m}\text{Xe}$ )	0.00	0.03	0.10	0.06	0.03	0.03
$^{133m}\text{Xe}$	0.08	–	0.07	0.04	–	–
$^{133}\text{Xe}$	4.27	0.00	4.57	2.48	–	–
$^{95}\text{Zr}$	0.33	13.3	5.41	2.94	5.44	6.27
$^{95}\text{Nb}$	0.34	13.7	5.82	3.16	5.91	6.80
$^{97}\text{Zr}$	0.02	0.7	0.32	0.17	0.32	0.37
$^{99}\text{Mo}$	0.83	33.4	5.12	2.78	5.00	5.76
$^{103}\text{Ru}$	1.34	53.9	14.7	8.00	14.0	16.1
$^{106}\text{Ru}$	0.42	16.7	1.83	0.99	1.67	1.92
$^{134}\text{Cs}$	0.12	1.8	2.38	1.29	2.41	2.77
$^{136}\text{Cs}$	0.04	0.8	0.94	0.51	0.92	1.06
$^{137}\text{Cs}$	0.25	3.70	1.16	0.63	1.18	1.36
$^{140}\text{Ba}$	0.29	11.8	1.15	0.62	1.29	1.49
$^{140}\text{La}$	0.13	5.25	6.63	3.60	6.03	6.95
$^{141}\text{Ce}$	0.30	12.2	0.52	0.28	0.53	0.60
$^{143}\text{Ce}$	0.07	2.64	0.39	0.21	0.45	0.52
$^{144}\text{Ce}$	0.25	10.2	0.11	0.06	0.36	0.41
$^{156}\text{Eu}$	0.01	0.53	0.39	0.21	0.35	0.40
$^{239}\text{Np}$	1.35	54.3	4.86	2.64	5.05	5.81
$\Sigma$			<b>184</b>		<b>86.8</b>	

Note.  $C_{RN-a}$  – radionuclide concentration in air 28.04.86;  $\sigma_{RN-s}$  – surface soil contamination with radionuclides 29.04.86;  $P_{\gamma a}$  – capacity of exposure dose from radioactive cloud;  $P_{\gamma s}$  – capacity of exposure dose from contaminated soil.

Table 2

Radionuclides characterizing the radiation situation in Gomel 1986 April 28–29

Radionuclide	$C_{RN-a}$ , kBq/m <sup>3</sup>	$\sigma_{RN-s}$ , kBq/m <sup>2</sup>	$P_{\gamma a}$ , $\mu\text{R}/\text{hour}$ (28.04.86)	$P_{\gamma a}/\sum P_{\gamma a}$ , %	$P_{\gamma s}$ , $\mu\text{R}/\text{hour}$ (29.04.86)	$P_{\gamma s}/\sum P_{\gamma s}$ , %
$^{131}\text{I}$	42.94	482.3	364.9	9.82	106.1	6.84
$^{132}\text{Te}$ ( $^{132}\text{I}$ )	41.49	466.0	2108	56.73	577.9	37.28
$^{133}\text{I}$	10.34	116.1	136.5	3.67	37.16	2.40
$^{135}\text{I}$ ( $^{135m}\text{Xe}$ )	0.057	0.636	2.109	0.06	0.534	0.03
$^{133m}\text{Xe}$	1.598	–	1.466	0.04	–	–
$^{133}\text{Xe}$	85.31	–	91.21	2.45	–	–

Ending table 1

Radionuclide	$C_{RN-air}$ , kBq/m <sup>3</sup>	$\sigma_{RN-s}$ , kBq/m <sup>2</sup>	$P_{\gamma a}$ , $\mu$ R/hour (28.04.86)	$P_{\gamma a} / \sum P_{\gamma a}$ , %	$P_{\gamma s}$ , $\mu$ R/hour (29.04.86)	$P_{\gamma s} / \sum P_{\gamma s}$ , %
<sup>99</sup> Mo	16.21	542.8	100.0	2.69	81.42	5.25
<sup>103</sup> Ru	26.19	876.7	288.1	7.75	227.9	14.71
<sup>106</sup> Ru	8.123	271.9	35.74	0.96	27.19	1.75
<sup>134</sup> Cs	1.344	45.02	46.50	1.25	39.16	2.53
<sup>136</sup> Cs	0.385	12.89	18.29	0.49	14.95	0.96
<sup>137</sup> Cs	1.798	60.20	22.66	0.61	19.26	1.24
<sup>95</sup> Zr	6.452	216	105.8	2.85	88.56	5.71
<sup>95</sup> Nb	6.678	223.6	113.7	3.06	96.14	6.20
<sup>97</sup> Zr	0.317	10.63	6.172	0.17	5.206	0.34
<sup>140</sup> Ba	5.716	191.4	22.45	0.60	21.05	1.36
<sup>140</sup> La	2.550	85.37	129.6	3.49	98.18	6.33
<sup>141</sup> Ce	5.935	198.7	10.21	0.27	8.545	0.55
<sup>143</sup> Ce	1.282	42.93	7.525	0.20	7.298	0.47
<sup>144</sup> Ce	4.956	165.9	2.131	0.06	5.807	0.37
<sup>154</sup> Eu	0.258	8.640	7.663	0.21	5.616	0.36
<sup>239</sup> Np	26.37	882.9	94.93	2.56	82.11	5.30
$\Sigma$			<b>3715</b>		<b>1550</b>	

Note.  $C_{RN-air}$  – radionuclide concentration in air 28.04.86;  $\sigma_{RN-s}$  – surface soil contamination with radionuclides 29.04.86;  $P_{\gamma a}$  – capacity of exposure dose from radioactive cloud;  $P_{\gamma s}$  – capacity of exposure dose from contaminated soil.

The tables 1 and 2 show that the main contribution to the capacity dose during radioactive cloud pass was made by iodine isotopes (about 70 %). The contribution of other short-lived isotopes to the capacity dose is about 30 %, the most dangerous of them are: <sup>103</sup>Ru (about 8 %), <sup>95</sup>Zr and <sup>95</sup>Nb (about 6 %), <sup>140</sup>Ba and <sup>140</sup>La (about 4 %), <sup>239</sup>Np (about 5 %) and <sup>99</sup>Mo (about 3 %) [14; 15].

Based on the above, the reconstruction of radiation situation during the active stage was carried out (from 26.04.86 to 05.05.86) [15]. The following experimental data and provisions were used to reconstruct of the radiation situation:

1. Generalized data bank for Belarus (more than 19000 points, formed in the Institute of Radiobiology of the National Academy of the Republic of Belarus [12]), containing information on the population, contamination of soil, air with iodine isotopes, <sup>132</sup>Te, <sup>95</sup>Zr, <sup>95</sup>Nb, <sup>99</sup>Mo, <sup>103</sup>, <sup>106</sup>Ru, <sup>133</sup>Xe, <sup>140</sup>Ba, <sup>140</sup>La, <sup>239</sup>Np, <sup>156</sup>Eu.

2. Direct measurement data of daily isotope fallout of iodine using the formula (1) and reconstruction data <sup>131</sup>I to <sup>129</sup>I [16–20]:

$$\sigma_I(t_i) = \sum_{k=1}^i \sigma_k \eta_k \exp(-\lambda t_i), \quad (1)$$

where  $\sigma_k$  — daily amount of iodine-131 fallout, kBq/m<sup>2</sup>, given to 26.04.86;  $\eta_k(t) - ^{131}\text{I}$  of the total amount of <sup>131</sup>I fallout on the day  $t$  and given to 26.04.86;  $t_i$  – the time has passed since the accident, day;  $\lambda$  – radioactive decay constant of <sup>131</sup>I, equal to 0.0862 1/day.

3. When there was no direct measurement data of <sup>131</sup>I, the reconstruction was carried out with <sup>137</sup>Cs data [21; 22] (minus global dropouts <sup>137</sup>Cs), according to the formula:

$$\sigma_I(t_i) = \sum_{k=1}^i \eta_k(t) \exp(-\lambda t_i) \kappa \sigma_{Cs}, \quad (2)$$

where  $t_i$  – the time has passed since the accident, day;  $\eta_k(t) - ^{131}\text{I}$  of the total amount of <sup>131</sup>I fallout on the day  $t$  and given to 26.04.86;  $\kappa$  – ratio of iodine-131 fallout integral to cesium-137 fallout integral for this locality given to 26.04.86;  $\sigma_{Cs} - ^{137}\text{Cs}$  integral amount that fell out on the soil surface and grass at the locality, kBq/m<sup>2</sup> (minus global dropouts <sup>137</sup>Cs) given to 26.04.86.

Based on the data of the radiation situation reconstruction of the territory of the Republic of Belarus using GIS-technology (Quantum GIS and ArcView-10.6.1), the maps of contamination dynamics of Belarus with <sup>131</sup>I during the period from 26.04.05 to 03.05.86 were made (Fig. 3) and <sup>132</sup>Te, <sup>95</sup>Zr, <sup>95</sup>Nb, <sup>99</sup>Mo, <sup>103</sup>, <sup>106</sup>Ru, <sup>133</sup>Xe, <sup>140</sup>Ba, <sup>140</sup>La, <sup>239</sup>Np, <sup>156</sup>Eu (Fig. 4) [15].

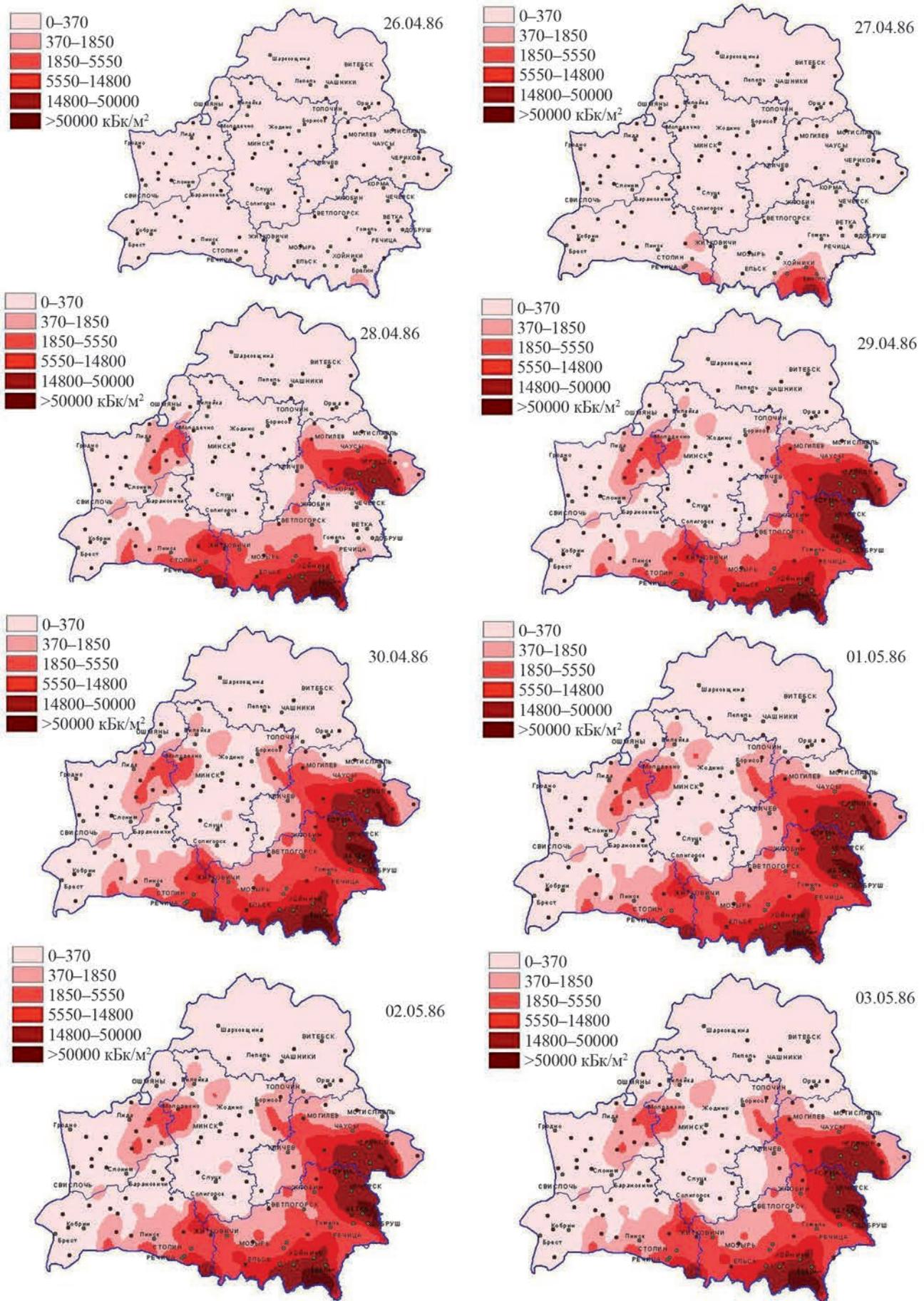


Fig. 3. Contamination dynamics of the territory of Belarus with  $^{131}\text{I}$  from 26.04.86 to 03.05.86

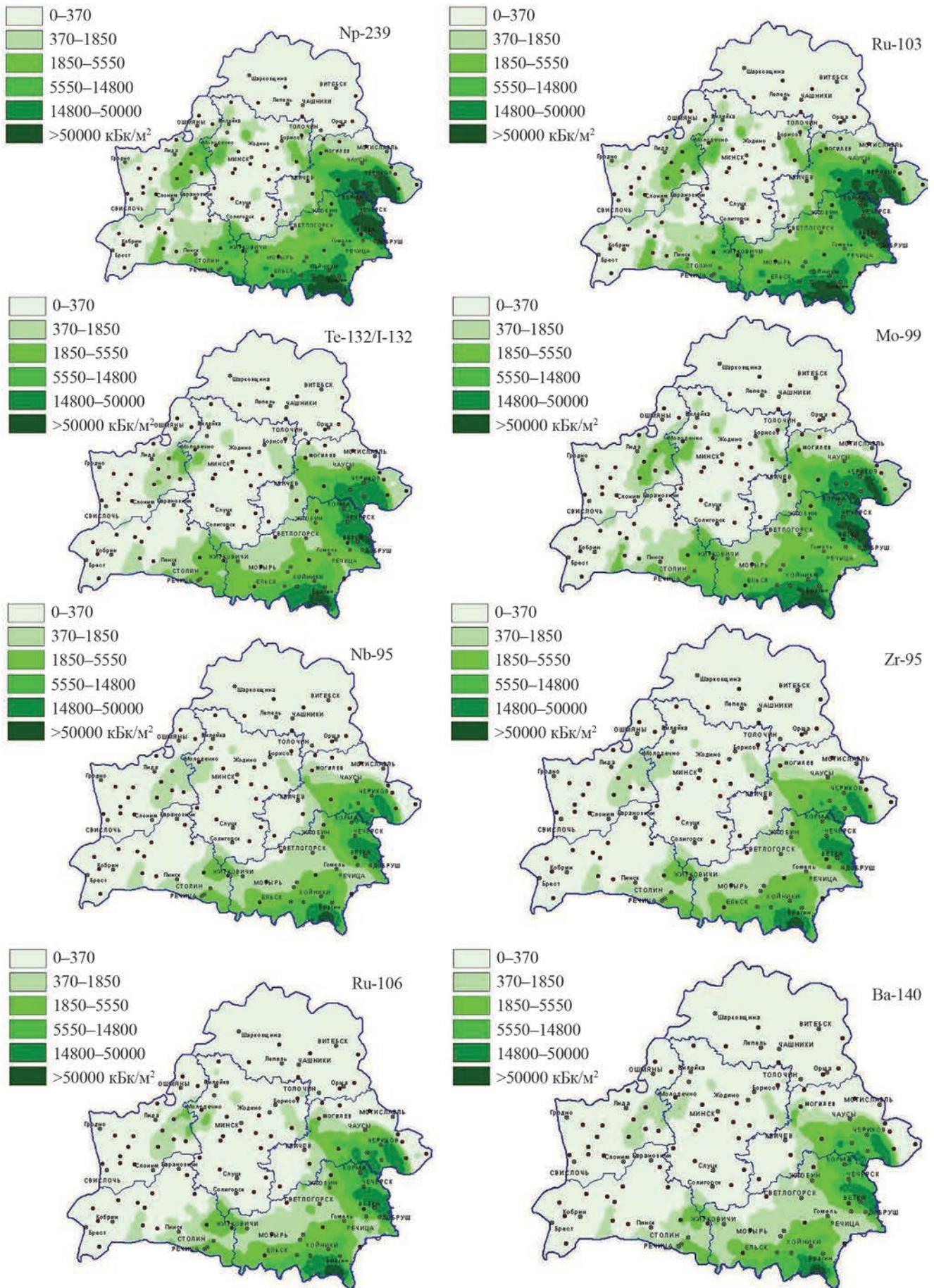


Fig. 4. Contamination of the territory of Belarus with short-lived radionuclides on April 28–29, 1986

Thus, besides iodine isotopes, a visible contribution to the formation of contamination of the territory of Belarus during accident active stage was made by the radionuclides  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{239}\text{Np}$ .

*Stabilization of radiation situation and III. Cesium-strontium stages.* The second and the third stages are characterized by a decrease in radionuclide radiation contamination with a half-elimination period about a year by hundreds and thousands times due to natural radioactive decay. Visible destruction of fuel particles and increased migration of  $^{90}\text{Sr}$  began [23]. Radiation situation at this stage was mainly caused by the radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  (Fig. 5) [24].  $^{90}\text{Sr}$  migration in the soil and food chain as a result of the destruction of fuel particles is highly increased which is most common for the western trace where uranium was at primary fallout in unoxidized form. As fuel particles are destroyed, strontium enters soil solutions and migrates deep in the soil demonstrating all properties as a chemical element. It is confirmed by an increase in the fractionation coefficient of strontium to uranium with depth. There is a noticeable accumulation of  $^{241}\text{Am}$  due to the decay of  $^{241}\text{Pu}$ .

Based on the results of radiation monitoring of the environment, the maps of contamination of the territory of Belarus with cesium-137 were made on 10.05.1986 (Fig. 5) and contamination with strontium-90 in 2016 (Fig. 6).

*Actinide stage.* Due to natural decay and partly as a result of vertical and horizontal migration, contamination with  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  decreased hundreds of times. Contamination is mainly determined by actinides  $^{239,240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  while contamination with  $^{241}\text{Am}$  is higher than contamination with  $^{239,240}\text{Pu}$ .

Chernobyl disaster led to uneven contamination of surface soil of Belarus with transuranic elements.  $^{239+240}\text{Pu}$  content of «Chernobyl» origin changed from  $1,1 \cdot 10^5 \text{ Bq/m}^2$  for the territories located near Chernobyl NPP to average global levels in the north of the Republic of Belarus. Dangerous contamination levels are situated locally in radioactive spots of near trace. Constant growth of  $^{241}\text{Am}$  in all ecosystem components of Belarus as a result of a natural decay of  $^{241}\text{Pu}$  is observed (Fig. 7) [25; 26].

According to our calculations, maximum contamination level with  $^{241}\text{Am}$  will have established by 2060 and will exceed  $^{239+240}\text{Pu}$  2,7 times while the territories with contamination level with  $^{238+239+240}\text{Pu} + ^{241}\text{Am}$  to  $1000 \text{ Bq/m}^2$  possibly will extend beyond 30 kilometer zone.

It should be noted that important information can be received from the analysis of radionuclide ratio concentration in the air at different periods of the accident.  $^{90}\text{Sr}$  activity ratio to  $^{239+240}\text{Pu}$  for the entire observation period remained practically at the same level, on average  $100 \pm 10$ . This value coincides with ratio activity of  $^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$  in the fuel of exploded reactor [4; 23], while concentration ratio of  $^{137}\text{Cs}/^{239+240}\text{Pu}$  in the air significantly exceeds the calculated for the fuel. It follows that on the territory of Belarus plutonium and strontium were in the form of fuel particles in the air while the main form of  $^{137}\text{Cs}$  existence are another aerosol particles (condensation) formed as a result of cesium fall, vaped during active zone burning of nuclear reactor on «cold» aerosol particles having natural and anthropogenic origin.

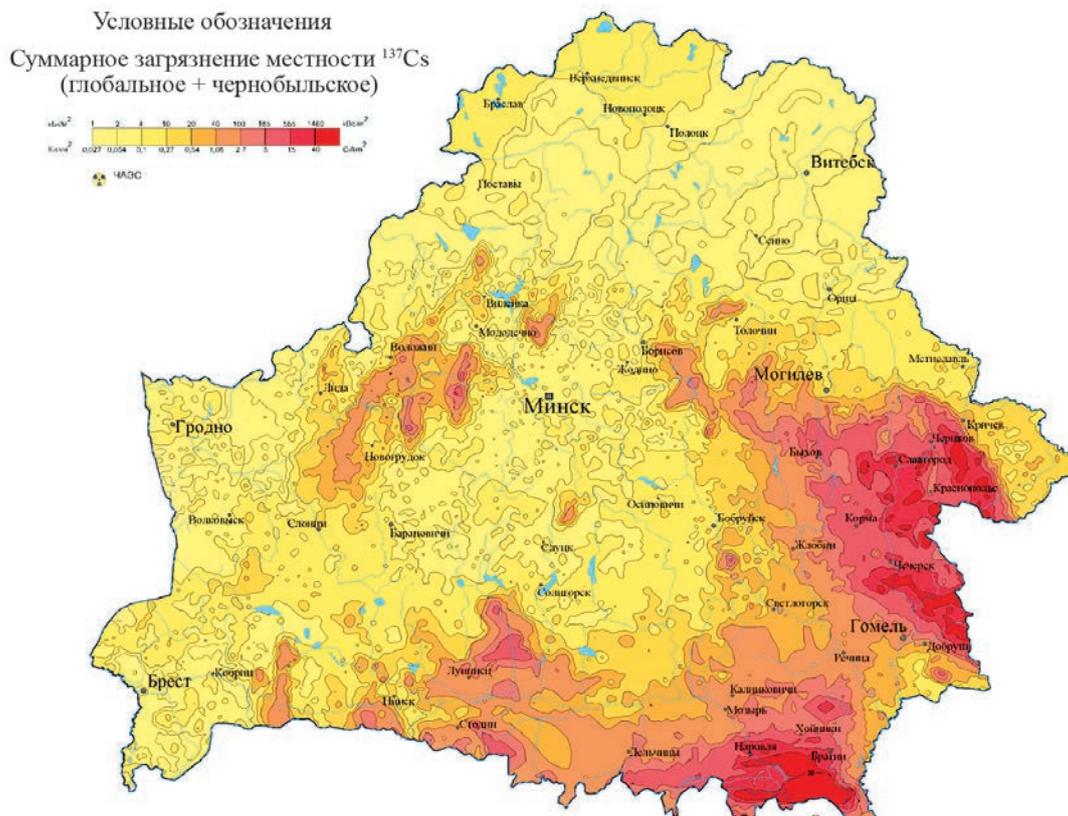


Fig. 5. Contamination map of the territory of Belarus with  $^{137}\text{Cs}$  May 10, 1986

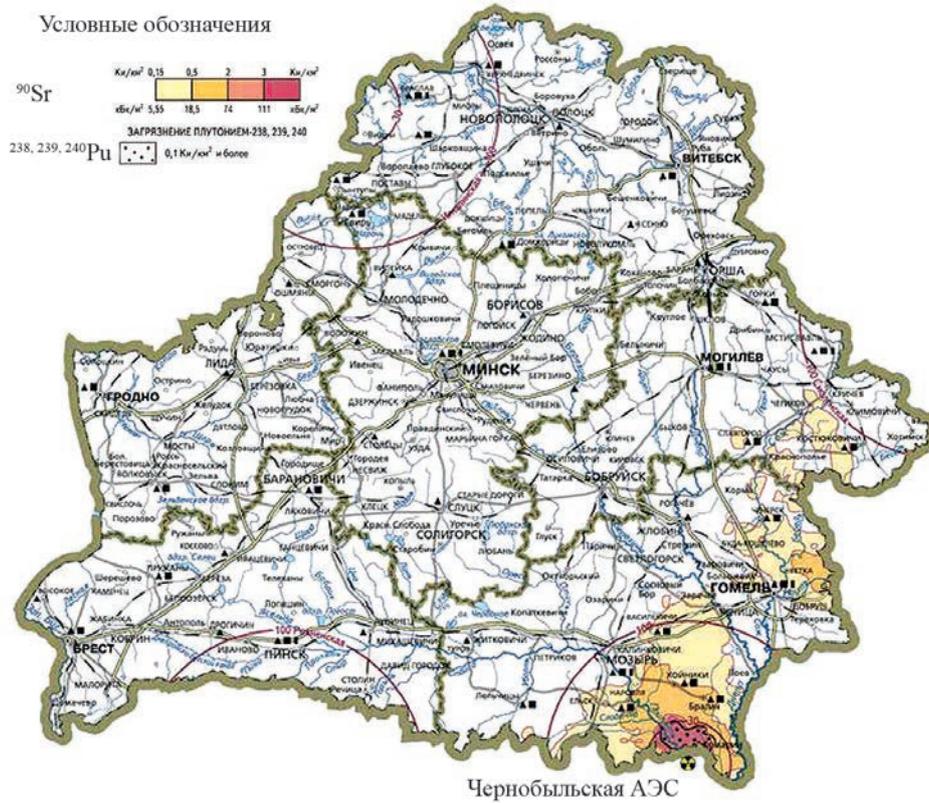


Fig. 6. Radioactive contamination of the territory of Belarus with  $^{90}\text{Sr}$  and plutonium isotopes<sup>1</sup>

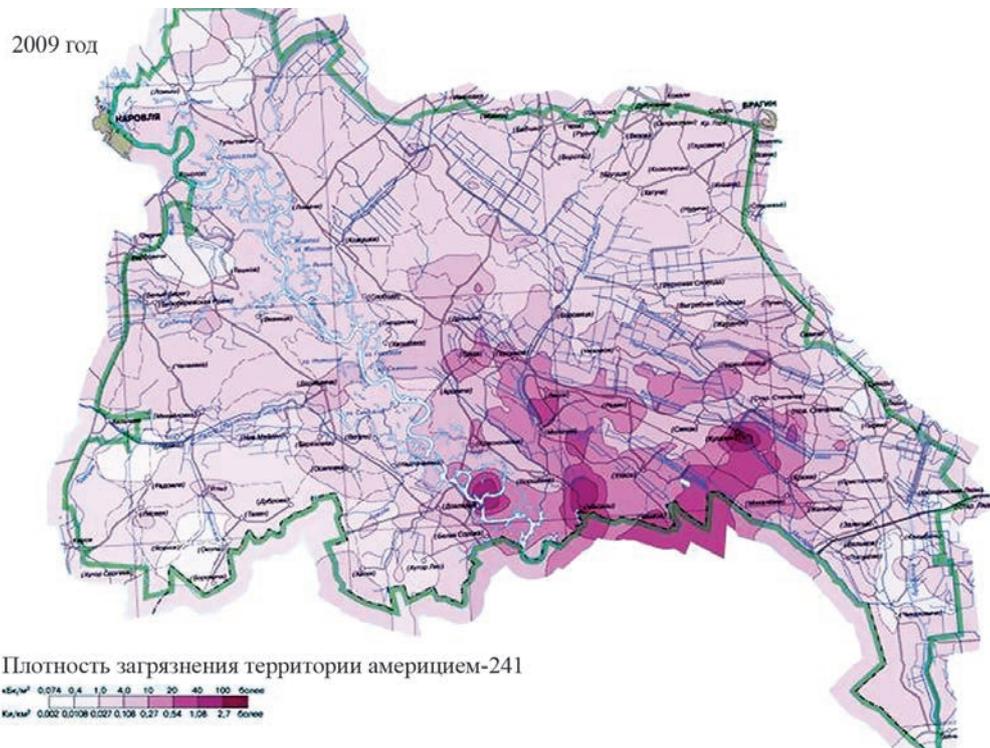


Fig. 7. Soil contamination on the territory of «Polesie State Radiation and Ecological Reserve» with  $^{241}\text{Am}$  in 2009 according to measurements<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Map – RB 2015 (Forecast): Radiation situation on the territory of the Republic of Belarus: Map of contamination of the territory with strontium-90 and plutonium-238, 239, 240: as of 2015 1: 3,000,000, 30 km in 1 cm / compiled and prepared for publication by the Republican Unitary Enterprise «Belkartography» in 2004. The special content was prepared by the State Institution «Republican Center for Hydrometeorology and Control».

<sup>2</sup>Map – RB 2015 (Forecast): Radiation situation on the territory of the Republic of Belarus: Map of contamination of the territory with strontium-90 and plutonium-238, 239, 240: as of 2015 1: 3,000,000, 30 km in 1 cm / compiled and prepared for publication by the Republican Unitary Enterprise «Belkartography» in 2004. The special content was prepared by the State Institution «Republican Center for Hydrometeorology and Control».

The analysis of radioactive contamination forecast results at the example of the defining point Masany allows making local forecast for the Masany, regional forecast for the territory of Belarus (100 km and more from the Chernobyl NPP).

The local forecast for the defining point Masany allows confirming radioactive contamination is the most long-term in Europe and includes all four stages from the iodine-neptunium phase to the actinide stage. Taking into account the peculiarities of soil contamination radionuclide composition on the territory of «Polesie State Ecological Reserve», this conclusion can be used to evaluate the radiation situation in the south-west of Gomel region, where the soil is contaminated with the radionuclides of plutonium and americium. It should be noted that the analysis of soil contamination radionuclide composition near the Chernobyl NPP on the territory of Ukraine allows making the same conclusions.

Thus, at the local level (up to 100 km from the source) the radiation situation includes all stages from the iodine-neptunium phase to the actinide stage.

The forecast at the regional level for the rest territory of Belarus allows making a conclusion that when the iodine-neptunium phase ends and the radiation situation stabilizes the soil radioactive contamination will decrease during the cesium-strontium stage. According to IAEA recommendations, this situation can be evaluated as an existing radiation situation. When the cesium-strontium stage ends (up to 100 km from the source) without the actinide stage the existing radiation situation will stop.

### Conclusion

Thus at the moment of radioactive cloud passage (the first stage) the isotopes  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$  ( $^{132}\text{Te}$ ) made the main contribution to the contamination of the territory of Belarus (exposure rate dose is about 70 %). The contribution of other short-lived isotopes to exposure dose rate was about 30 %, most dose-formed of them are:  $^{103}\text{Ru}$  (8 %),  $^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$  (6 %),  $^{140}\text{Ba} - ^{140}\text{La}$  (4 %),  $^{239}\text{Np}$  (5 %) and  $^{99}\text{Mo}$  (3 %). A situation of accidental radiation has developed throughout Belarus.

Radiation situation at the second and the third stages mainly caused by the radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ .  $^{90}\text{Sr}$  migration in the soil and food chain as a result of the destruction of fuel particles is highly increased which is most common for the western trace where uranium was at primary fallout in unoxidized. On the territory of Belarus, the radiation situation was characterized as an existing radiation situation.

At actinide stage, the contamination is mainly determined by  $^{239}, ^{240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  while contamination with  $^{241}\text{Am}$  is higher than contamination with  $^{239}, ^{240}\text{Pu}$ . Constant growth of  $^{241}\text{Am}$  in all ecosystem components of Belarus as a result of  $^{241}\text{Pu}$  natural decay. On the territory of Belarus, the existing radiation situation remained at the local level (up to 100 km from the Chernobyl NPP).

### References

1. Germenchuk MG. The Chernobyl Disaster and the Environment: 35 Years of Scientific Research and Solutions. In: Sakharov Readings 2021: Environmental Problems of the 21<sup>st</sup> Century Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Scientific Conference, 2021 May 20–21, Minsk, Republic of Belarus: at 2 h. Minsk: Information Center of the Ministry of Finance, 2021. Russian.
2. Zhuravkov VV, Germenchuk MG. Assessment of the consequences of radionuclides entering the environment based on the data of radiation monitoring conducted in the Gomel region. In: Materials of the XIV International scientific and practical conference «Actual problems of ecology – 2021», 2021 September 22–24. Grodno: [publisher unknown]; 2021. p. 198–200. Russian.
3. Germenchuk MG, Zhukova OM. Scientific foundations of radiation monitoring of the environment and the role of hydrometeorological service in its organization on the example of the Chernobyl disaster. *Ecological Bulletin*. 2014;4:12–25. Russian.
4. Mironov VP, Kudrjashov VP. Plutonium radioisotopes in the air in the northeastern part of Lithuania and the west part of Belorussia after the Chernobyl accident. *Atmospheric Physics*. 1995;17:19–23.
5. Ryabukhin YuS, Yarmonenko SP, editors. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000. Appendix J. Exposure levels and effects from the Chernobyl accident. Moscow: Radekon; 2001. 152 p. Russian.
6. Kutkov VA, Pogodin RI. Inhalation of the aerosol of nuclear fuel particles from Chernobyl NPP by adult persons from the Gomel region of Belarus. Proceeding of an international symposium on Environmental impact of radioactive releases. IAEA. Vienna: [publisher unknown]; 1995. p. 107–115.
7. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Coping with Them: Twenty Years of IAEA Experience, Vienna: [publisher unknown]; 2008.
8. Mironov VP, Zhuravkov VV, Ananich PI, Bulyga SF, et al. Determination of the amount and depth of burnup of uranium fuel in fallout in contaminated areas after the Chernobyl disaster using a uranium-236 tracer. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Serie fiziko-tekhnicheskikh nauk*. 2005;4:121–123. Russian.
9. Mironov V, Pribylev S, Zhuravkov V. The use of  $^{236}\text{U}$  as a tracer of irradiated uranium. Security through Science Series: SPRINGER publishing house; 2009. 13 p.
10. Mironov VP, Matusevich ZhL, Kudryashov VP, Ananich PI, Zhuravkov VV. Method for determining the burnup depth and the amount of uranium fuel in fallout on the territory of Belarus after the Chernobyl disaster using the U-236 tracer. In: Modern problems of radioecology. Sat. materials scient.–practical conference, Minsk, 2002 December 12–13, Belarus. Minsk: [publisher unknown]; 2002. p. 89–91. Russian.

11. Loschilov NA, et al. Nuclear-physical characteristics of hot particles formed as a result of the Chernobyl accident. *Radiochemistry*. 1992;4:113–119. Russian.
12. Boulyga SF, Matysevich JL, Mironov VP, et al. *International Journal of Mass Spectrometry*. 2000;203:143–154. Russian.
13. Gerasimov AS, et al. Handbook on the formation of nuclides in nuclear reactors. Moscow: Energoatomizdat; 1989. 575 p. Russian.
14. Zhuravkov VV. Reconstruction of the dynamics of contamination of the territory of Belarus with short-lived radionuclides and assessment of doses to the thyroid gland of the population during the active stage of the Chernobyl accident. [PhD thesis]. Gomel: [publisher unknown]; 2006. 24 p. Russian.
15. Konoplia EF, Mironov VP, Zhuravkov VV. Radiation and Chernobyl: Short-lived radionuclides on the territory of Belarus. Minsk: Belarus. science; 2008. 198 p. Russian.
16. Mahonko VA, Kozlova EG. Dynamics of radioiodine accumulation on the soil after the Chernobyl accident. In: *Radiation and risk*. Obninsk: [publisher unknown]; 1996. Issue. 7. p. 140–191. Russian.
17. Mironov V, Kudryashov V, et al. The use of iodine-129 to reconstruct the content of iodine-131 in the thyroid gland of the population during the active stage of the Chernobyl accident: scientific foundations and possibilities. Minsk: [publisher unknown]; 1999. 42 p. Russian.
18. Mironov V, Kudryashov V, Yiou F, Raisbeck GM. Use of  $^{129}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in soils for the estimation of  $^{131}\text{I}$  deposition in Belarus. *Journal Environmental Radioactivity*. 2002;59:293–307. Russian.
19. Straume T, Marchetti AA, Anspaugh LR, et al. The feasibility of using  $^{129}\text{I}$  to reconstruct  $^{131}\text{I}$  deposition from the Chernobyl reactor accident. *Health Physics*. 1996;71(5):733–740.
20. Gavrilin Y, Khrouch V, Drozdovich V, Minenko V. Estimation of thyroid doses received by the population of Belarus as a result of the Chernobyl accident. In: The radiological consequences of the Chernobyl accident: Proceeding of the first international conference, Minsk, 1996 march 18–22. Minsk: [publisher unknown]; 1996. p. 1018–1019. Russian.
21. Pollution of the territory of the settlements of the Republic of Belarus with  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and Pu in January 1998. Minsk: Belhydromet, 1998. Russian.
22. Nesterenko VB, Mironov VP, et al. Study of the radiation situation on the territory of the BSSR after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. In: Report on research. Minsk: [publisher unknown]; 1988. p. 22–34. Russian.
23. Mironov VP, Kudryashov VP, et al. Determination of fuel particles on the territory of the BSSR. *Izvestiya AN BSSR. Seria FEN*. 1991;4. Russian.
24. Germenchuk MG, et al. Atlas of European pollution with cesium after the Chernobyl accident: collection of maps. Luxembourg: Luxembourg Office for Official Publications of the European Communities; 1998. 65 p.
25. Germenchuk MG. Radiation monitoring of the environment: a tutorial. Minsk: [publisher unknown]; 2021. 307 p. Russian.
26. Germenchuk MG, et al. Atlas of modern and predictive aspects of the consequences of the Chernobyl accident in the affected territories of Russia and Belarus: a collection of maps. Minsk: Belkartography; 2009. 135 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 12.11.2021.  
Received by editorial board 12.11.2021.

УДК 618.19-006.6(476.5)

## ОСОБЕННОСТИ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ РАКОМ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ (ПО ДАННЫМ ВИТЕБСКОГО ОБЛАСТНОГО КЛИНИЧЕСКОГО ОНКОЛОГИЧЕСКОГО ДИСПАНСЕРА)

Ю. Ю. МАСАЛКОВА<sup>1)</sup>, Д. И. БЕЛЯЕВА<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>*Витебский государственный медицинский университет,  
пр. Фрунзе, 27, 210009, г. Витебск, Беларусь*

Представлены результаты статистической обработки данных по диагностике рака молочной железы пациентов в УЗ «Витебский областной клинический онкологический диспансер» за 2019–2020 гг. Проанализированы выписки из медицинских карт 1061 пациента (617 – 2019 год; 444 – 2020 год) в возрасте от 20 до 99 лет. Изучены методы диагностики заболевания, стадии регистрации рака молочной железы, обстоятельства начала заболевания, соотношение поражения разных участков молочной железы согласно МКБ-10, результаты анализа возникновения заболевания в зависимости от возраста, особенности возникновения рецидивов и метастазов, летальность пациентов разных возрастных групп, соотношение пациентов городской и сельской местности.

В 91,99 % случаев для диагностики заболевания был использован морфологический метод, наименьшее применение нашли УЗИ-диагностика (0,75 % случаев) и рентгенологический (0,28 % случаев) метод диагностики. В большинстве своем (45,80 % случаев) заболевание было выявлено на II стадии, в 7,71 % случаев рак молочной железы регистрировался на IV стадии. В более чем половине случаев (50,51 %) заболевание поражало верхний наружный квадрант молочной железы, что соответствует коду C50.4 по МКБ-10 (злокачественное новообразование верхненаружного квадранта молочной железы). Отмечено возрастание риска возникновения рака молочной железы с увеличением возраста пациентов (аппроксимация – 0,9577), при среднем возрасте заболевших – 62 года. Рецидивы и метастазы были обнаружены у 13,57 % пациентов с раком молочной железы, причем в 36,81 % случаях – на IV стадии заболевания. Среди пациентов наибольшее количество рецидивов и метастазов (по 22 случая) было обнаружено в возрастных группах 55–59 и 60–64 лет. Летальность за 2019–2020 гг. составила 7,92 % (умерло 84 пациента,

---

### Образец цитирования:

Масалкова ЮЮ, Беляева ДИ. Особенности заболеваемости раком молочной железы (по данным Витебского областного клинического онкологического диспансера). *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;1:68–74.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-68-74>

### For citation:

Masalkova YuYu, Beliaeva DI. Peculiarities of breast cancer incidence according to Vitebsk Regional Clinical Oncological Dispenser. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;1:68–74. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-68-74>

---

### Авторы:

**Юлия Юрьевна Масалкова** – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологической и профилактической медицины.  
**Дарья Ивановна Беляева** – студентка лечебного факультета.

### Authors:

**Yuliya Yu. Masalkova**, PhD (biology); associate professor at the department of environmental and preventive medicine.  
[masalkovayulia@mail.ru](mailto:masalkovayulia@mail.ru)  
**Darya I. Beliaeva**, student of medical faculty.  
[darya.beliaeva@mail.ru](mailto:darya.beliaeva@mail.ru)

среди которых рецидивы и метастазы были выявлены у 38 человек). Большая часть всех пациентов (77,57 %) с выявленным РМЖ, проживают в городской местности, 22,43 % – пациенты из сельских населенных пунктов.

**Ключевые слова:** рак молочной железы; экология; факторы окружающей среды; диагностика; патогенез; летальность; лечение.

## PECULIARITIES OF BREAST CANCER INCIDENCE ACCORDING TO VITEBSK REGIONAL CLINICAL ONCOLOGICAL DISPENSER

*Yu. Yu. MASALKOVA<sup>a</sup>, D. I. BELIAEVA<sup>a</sup>*

<sup>a</sup>*Vitebsk State Medical University,  
27 Frunze Avenue, Vitebsk 210009, Belarus*

*Corresponding author: Yu. Yu. Masalkova (masalkovayulia@mail.ru)*

The results of statistical processing of data on the diagnostics of breast cancer in patients of the Vitebsk Regional Clinical Oncological Dispensary for 2019–2020 are presented in this article. Extracts from medical records of 1061 patients (617 – 2019; 444 – 2020) aged 20 to 99 years were analyzed. In particular, methods for diagnosing the disease, the stages of registration of breast cancer were studied, the circumstances of the detection of the disease, the ratio of lesions of different parts of the mammary gland according to ICD-10, the results of the analysis of the occurrence of the disease depending on age, the features of the occurrence of relapses and metastases, the mortality of patients of different age groups, the ratio of patients from urban and rural areas.

In 91.99 % of cases, the histological method was used to diagnose the disease. Echoscopic (0.75 % of cases) and X-ray (0.28 % of cases) diagnostic methods have found the least use. In the majority (45.80 % of cases) the disease was detected at stage II, in 7.71 % of cases breast cancer was registered at stage IV. In more than half of the cases (50.51 %), the disease affected the upper outer quadrant of the breast, which corresponds to the ICD-10 code C50.4 (Malignant neoplasm of the upper outer quadrant of the breast). There was an increase in the risk of breast cancer with increasing age of patients (approximation – 0.9577) with an average age of patients – 62 years. Relapses and metastases were found in 13.57 % of patients with breast cancer, and in 36.81 % of cases – at stage IV of the disease. Among patients, the largest number of relapses and metastases (22 cases each) was found in the age groups 55–59 and 60–64 years. Mortality for 2019–2020 was 7.92 % (84 patients died, among which relapses and metastases were detected in 38 people). Most of all patients (77.57 %) with diagnosed breast cancer live in urban areas, 22.43 % are patients from rural areas.

**Keywords:** breast cancer; ecology; environmental factors; diagnostics; pathogenesis; mortality; treatment.

### Введение

В современном мире рак молочной железы (РМЖ) является одной из наиболее распространенных, самых изученных, с научной точки зрения, форм рака и занимает первое место как в структуре онкологической заболеваемости женского населения, так и смертности женщин от злокачественных новообразований [1]. Что касается нашей страны, то, по имеющимся данным, в 2010 г. РМЖ занимал 2-е место в структуре заболеваемости женского населения злокачественными новообразованиями (46,9 %) после рака кожи (103,5 %) <sup>1</sup>, в 2019 г. – первое место в том же списке, исключая базалиому кожи [2]. В 2020 г. в Республике Беларусь было выявлено 4745 случаев рака молочной железы, что составило 11,3 % от общего количества злокачественных новообразований [3]. Лидирующей областью в 2019 г. по возникновению РМЖ является Гомельская (103,2 на 100 тыс. населения), наименьшее количество случаев регистрируется в Брестской области (91,2 на 100 тыс. населения) (рис. 1) [2].

В настоящее время выявлены множественные условия (в том числе экологические факторы), способствующие возникновению и развитию онкологических заболеваний молочных желез, что позволяет выделить контингент женщин с повышенным риском. Существует группа так называемых «известных факторов риска» (возраст, вес, количество детей, наличие определенных «генов рака молочной железы» и др.). Однако данные факторы позволяют объяснить только половину случаев заболевания раком молочной железы. Причиной остальных необъясненных 50 % случаев РМЖ считаются факторы окружающей среды при возрастающей частоте заболеваемости <sup>2</sup>. Причем точную причину ученым и врачам определить

<sup>1</sup>Гендерные проблемы онкологии в Беларуси. Медицинские новости [Электронный ресурс]. Минск, 2013. URL: <http://www.mednovosti.by/journal.aspx?article=5512> (дата обращения: 01.04.2021).

<sup>2</sup>Факторы риска заболевания раком молочной железы – известные и выявленные вновь [Электронный ресурс]. URL: <http://www.env-health.org> (дата обращения: 24.12.2021).

пока не удалось [4; 5]. Постоянно появляются новые подтверждения того, что воздействие загрязняющих веществ окружающей среды, пищи, воды, химических веществ в товарах широкого потребления в наших домах, офисах, школах может являться фактором риска заболевания раком молочной железы [6–10].

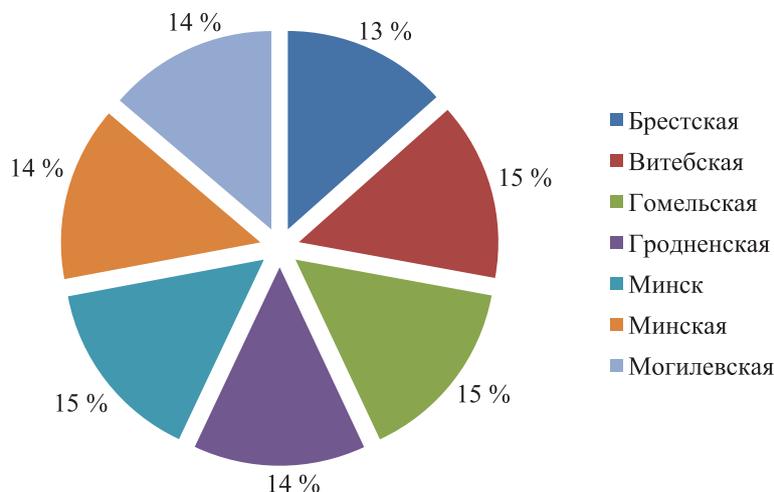


Рис. 1. Заболеваемость РМЖ по областям на 100 тыс. населения в 2019 г., %

Fig. 1. Breast cancer incidence by regions per 100,000 population in 2019, %

Большое значение среды в развитии РМЖ подтверждено исследованиями на близнецах и женщинах-иммигрантках [11; 12]. Так, по результатам исследований, проведенных на близнецах в Скандинавии, 27 % случаев рака молочной железы объясняется генетическими причинами, оставшиеся 73 % случаев обусловлены экологическими факторами среды [11]. Подтверждают влияние окружающей среды на вероятность развития заболевания раком и результаты исследований на японских женщинах (они обладают более низкой частотой заболеваемости раком молочной железы, чем женщины на Западе), переселившиеся в США. На протяжении одного-двух поколений у потомков женщин-иммигранток из Японии частота заболеваемости РМЖ увеличилась настолько, что сравнялась с частотой заболеваемости женщин в США [12].

Имеются исследования [13], подтверждающие увеличение вероятности заболевания раком молочной железы под действием факторов окружающей среды у женщин с повышенным риском заболеваемости вследствие генетической предрасположенности (наличия генов РМЖ).

Все это свидетельствует о необходимости выявления факторов окружающей нас среды, которые могут вызывать РМЖ, сведения к минимуму их воздействия, о проведении жестких природоохранных мероприятий, очищения и создания здоровой среды для существования человека.

Для повышения эффективности профилактических мероприятий в отношении РМЖ среди женского населения необходимо обладать наиболее полной информацией о распространении данного заболевания в том или иной регионе, особенностях патогенеза, применяемых методах его диагностики, особенностях лечения. Особенно велика ценность данной информации в отношении РМЖ в условиях невозможности обеспечения профилактическими мерами стопроцентной защиты от данного заболевания, вследствие чего необходима ранняя его диагностика.

Цель исследования – анализ диагностики рака молочной железы пациентов в УЗ «Витебский областной клинический онкологический диспансер» за 2019–2020 годы как основы для последующих исследований влияния факторов окружающей среды на возникновение данного заболевания в выбранном регионе.

### Материалы и методы исследования

Материалом для научного исследования явились выписки из 1061 медицинских карт пациентов (617 – 2019 год; 444 – 2020 год) в возрасте от 20 до 99 лет со злокачественными новообразованиями, в частности, раком молочной железы (далее РМЖ) канцер-регистра УЗ «Витебский областной клинический онкологический диспансер» за 2019–2020 годы. Всех пациентов с 20 до 99 лет разделили на 16 групп с диапазоном 5 лет: 20–24 года, 25–29 лет, 30–34 года, 35–39 лет, 40–44 года, 45–49 лет, 50–54 года, 55–59 лет, 60–64 года, 65–69 лет, 70–74 года, 75–79 лет, 80–84 года, 85–89 лет, 90–94 года, 95–99 лет.

В процессе анализа учитывали возраст пациентов, диагностику (обстоятельства выявления заболевания, методы подтверждения диагноза, стадию установления заболевания), изучали предложенные методы лечения.

Для статистической обработки данных использовали пакет *MS Excel 2007*. Результаты представлены в виде таблиц, графиков, диаграмм.

## Результаты исследования и их обсуждение

За 2019–2020 годы в Витебской обл. было выявлено 1061 случаев заболевания раком молочной железы: 617 – в 2019 г. и 444 – в 2020 г. Большая часть пациентов (77,57 % (823 случая) с РМЖ проживают в городской местности, 22,43 % (238 случаев) – пациенты из сельских населенных пунктов.

Чаще всего как в 2019, так и в 2020 г. для подтверждения диагноза злокачественного новообразования у пациентов диспансера применялся морфологические методы исследования – 92,54 % (571 пациент) и 91,22 % (405 пациентов) случаев соответственно. Цитологические методы были использованы в 6,48 % (40 пациентов) и 6,31 % (28 пациентов) случаев, клинические – в 0,16 % (1 пациент) и в 1,13 % случаев (5 пациентов), УЗИ-диагностика – в 0,32 % (2 пациента) и в 1,35 % (6 пациентов) случаев в 2019 и 2020 годах соответственно. В 0,49 % случаев (3 пациента) на протяжении 2019 г. нашли свое применение рентгенологические методы диагностики, не использовавшиеся в 2020 г. Следует отметить, что пациенты поступали в диспансер после обращения и обследования по месту жительства (в районных или областных поликлиниках и больницах).

Средний возраст заболевших пациентов составляет 62 года. Наибольший процент выявления случаев заболеваемости раком молочной железы в 2019 г. приходится на возрастной диапазон пациентов 60–64 лет – 17,83 % (110 случаев), снижается в старших возрастных группах (от 50 до 74 лет). В 2020 г. наибольшее число случаев заболеваемости раком молочной железы выявлялось в возрастном диапазоне 70–74 лет – 14,41 % (64 случая).

Определение величины аппроксимации между возрастом пациентов, в котором было выявлено заболевание, и количеством выявленных заболеваний, возникших в расчете на 100 тыс. населения, представлено на рис. 2. Аппроксимация составила 0,9577, что отражает возрастание риска возникновения рака молочной железы с увеличением возраста. Отмечается постепенное увеличение количества случаев заболевания с 20–24 лет при пике в возрастной группе от 60 до 64 лет и дальнейшим спадом.

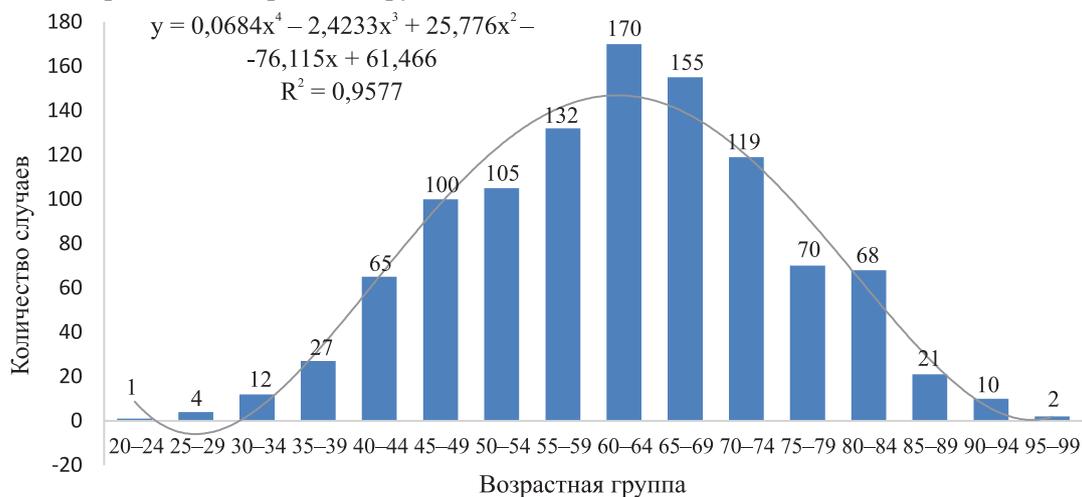


Рис. 2. Частота РМЖ в разных возрастных группах (на 100 тыс. населения)

Fig. 2. Frequency of breast cancer in different age groups (per 100 000 population)

Что касается стадий выявления, то больше всего случаев РМЖ как в 2019 (45,54 % случаев), так и в 2020 г. (46,40 % случаев) было выявлено на II стадии опухолевого процесса (табл. 1). Минимальное количество больных было выявлено на IV стадии – 8,43 % и 6,98 % за 2019 и 2020 года соответственно. Кроме того, в 2020 г. был выявлен 1 случай (0,23 %), когда стадию заболевания установить не удалось.

Таблица 1

### Распределение пациентов с РМЖ по стадиям заболевания

Table 1

#### Distribution of patients with breast cancer by disease stages

Стадия	Год	
	2019	2020
I	31,12 %	31,76 %
II	45,54 %	46,40 %
III	14,91 %	14,64 %
IV	8,43%	6,98 %

Это объясняется тем, что во многих случаях первые характерные симптомы заболевания, позволяющие поставить правильный диагноз, проявляются только на II стадии: небольшие узловатые образования в тканях молочной железы; уплотнения в области подмышек; болезненность груди; изменение формы молочной железы, ее размера; втягивание соска и выделения из него (чаще кровянистые, но могут быть прозрачными или зеленоватыми); уплотнение (образование так называемой панцирной корки); гиперемия и повышение температуры кожи [14].

Обстоятельства выявления рака молочной железы различны. Так, в 2019 г. максимальное количество зарегистрированных случаев заболевания (52,67 % – 325 пациентов) выявлено самостоятельно, 20,26 % (125 пациентов) зарегистрированных случаев при прохождении профосмотра, 20,75 % (128 пациентов) – в смотровом кабинете, при скрининге – в 6,16 % (38 пациентов), 0,16 % (1 пациент) учтен посмертно. В 2020 г. процент выявляемости заболевания в процессе прохождения профосмотра повысился до 40,99 % (182 пациентов), самостоятельно заболевание было установлено в 35,81 % (159 пациентов), в смотровом кабинете в 19,14 % (85 пациентов), при скрининге в 3,38 % (18 пациентов). Выявление заболевания в 2020 г. с помощью скрининга составило в 1,8 раза меньше, чем в 2019 г. Диагноз РМЖ в 2020 г. учтен посмертно в 0,46 % случаев (2 пациента). Минимальное количество случаев заболевания (0,23 % – 1 пациент) выявлено в результате параллельного профосмотра в 2020, в 2019 г. заболевание при данных условиях не выявлялось.

При распределении пациентов с РМЖ по группам согласно коду МКБ-10 получили следующую картину (рис. 3). Код С50 – злокачественное новообразование молочной железы: С50.0 – рак соска и ареолы (1,13 % в 2019 и 0,68 % в 2020 г.), С50.1 – рак центральной части молочной железы (5,83 % в 2019 и 7,21 % в 2020 г.), С50.2 – рак верхневнутреннего квадранта молочной железы (12,48 % в 2019 и 18,92 % в 2020 г.), С50.3 – рак нижневнутреннего квадранта молочной железы (3,89 % в 2019 и 4,73 % в 2020 г.), С50.4 – рак верхненаружного квадранта молочной железы (54,78 % в 2019 и 45,72 % в 2020 г.), С50.5 – рак нижненаружного квадранта молочной железы (10,86 % в 2019 и 8,11 % в 2020 г.), С50.6 – рак подмышечной задней части молочной железы (0,23 % в 2020 г.), С50.8 – поражение молочной железы, выходящее за пределы одной и более вышеуказанных локализаций (8,43 % в 2019 и 9,68 % в 2020 г.), С50.9 – рак молочной железы неуточненной части (2,59 % в 2019 и 4,73 % в 2020 г.).

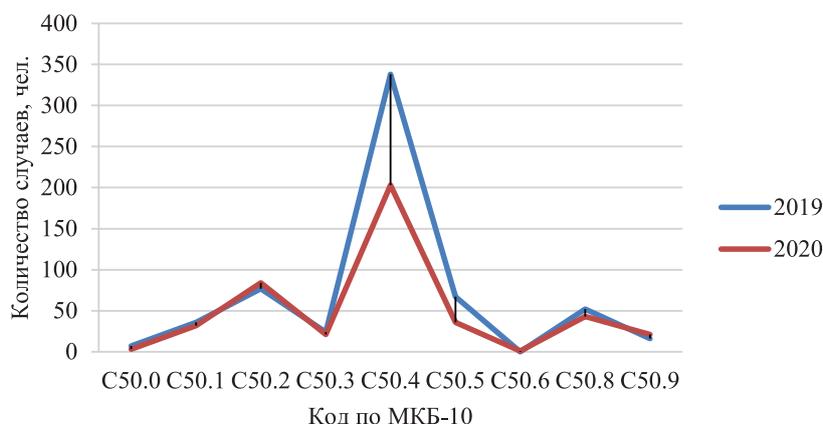


Рис. 3. Локализация опухоли в МЖ в соответствии с МКБ-10

Fig. 3. Tumor localization in the breast according to ICD-10

Наибольшее количество случаев рака молочной железы соответствует форме С50.4 как в 2019 (54,78 %), так и в 2020 (45,72 %) году, наименьшее – С50.0 (1,13 %) в 2019 г., С50.6 (0,23 %) в 2020 году.

В процессе исследования в 97 и 47 случаях в 2019–2020 гг. соответственно было выявлено возникновение рецидивов и метастазов. Изучение зависимости их возникновения от возраста пациента на момент установления диагноза представлено на рис. 4.

Коэффициент корреляции между возрастом возникновения рецидивов и метастазов составил 0,742, что соответствует прямой высокой степени связи между исследуемыми признаками.

При анализе стадий заболевания, на которой обнаружены рецидивы и метастазы установили, что наибольшее количество рецидивов и метастазов было выявлено на IV и II стадии рака молочной железы: на I стадии – 4,17 %; на II стадии – 34,72 %; на III стадии – 24,31 %; на IV стадии – 36,81 %.

Летальность среди пациентов с выявленными рецидивами и метастазами за 2019–2020 гг. составила 26,39 % (38 чел.). От основного заболевания скончалось 84,21 % (32 чел.), от других заболеваний – 15,79 % (6 чел.).

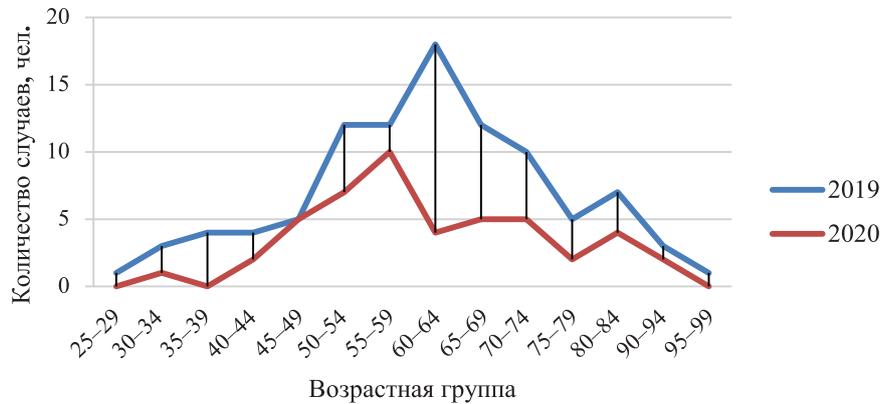


Рис. 4. Прогрессирование (рецидивы и метастазы) в зависимости от возраста пациентов

Fig. 4. Progression (kelapses and metastases) depending on the age of patients

Количество пациентов, умерших за 2019 г., составило 57 (9,24 %) чел., 27 (6,08 %) пациентов умерло за 2020 г. Причины смерти: скончались от основного заболевания (рака молочной железы) и скончались от других заболеваний (I70.9, I25.1, I50.0, R549, B97.2).

Возраст большинства пациентов, скончавшихся от основного заболевания (66,67 %), составил 66–67 лет при возрасте пациентов, скончавшихся от других заболеваний (33,33 %), 75–76 лет.

У 38 (45, 24 %) из 84 пациентов, умерших в 2019–2020 гг., прогрессирование заболевания проявлялось метастазами в легкое, в печень, головной мозг, отдаленные МТСв кости, регионарные МТС, отдаленные МТС, множественные МТС, МТСв надключичные узлы. В данной группе пациентов IV стадия рака молочной железы имела место в 44,44 % случаев, II и I стадия – у 37,04 % и 11,11 % пациентов соответственно. У 7,41 % пациентов была обнаружена III стадия заболевания.

### Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что самыми распространенными методами подтверждения заболевания пациентов УЗ «Витебский областной клинический онкологический диспансер» на протяжении 2019–2020 гг. явились морфологические (91,99 % случаев). Наименее используемые методы – УЗИ-диагностика (0,75 % случаев) и рентгенологические (0,28 % случаев).

Чаще всего (в 45,80 % случаях) заболевание было выявлено на II стадии, когда опухоль достигала размеров пяти сантиметров. В 47,79 % случаях рак молочной железы выявлялся при других видах профосмотра и самостоятельно (26,77 %). Выявление заболеваний при скрининге составило 5 %.

Наибольшее количество выявленных случаев соответствует коду C50.4 (злокачественное новообразование верхненаружного квадранта молочной железы) – 50,51 %.

Что касается возрастного распределения заболевания, то наибольшее количество случаев было выявлено в возрастной группе от 60 до 64 лет (16,02 %), чуть ниже в возрастных группах от 65 до 69 лет (14,61 %) и от 55 до 59 лет (12,44 %). Наименьшее количество РМЖ регистрировалось в молодом возрасте – 20–24 лет (0,23 %). Средний возраст заболевших пациентов составил 62 года.

Рецидивы и метастазы были обнаружены у 13,57 % пациентов, из них в 36,81 % случаев имела место IV стадия заболевания. Наиболее часто (по 22 случая) рецидивы и метастазы имели место в возрастных группах от 55–59 лет, 60–64 года. Одинаков процент возникновения рецидивов и метастазов в возрастных группах от 30 до 34 лет, от 35 до 39 лет и составил 2,78 % (по 4 случая в каждой из перечисленных возрастных групп). В возрастных группах от 25 до 29 лет и от 95 до 99 лет составил 0,69 % (по 1 случаю в каждой из перечисленных возрастных групп). Летальность среди пациентов за 2019–2020 гг. с выявленными рецидивами и метастазами составила 26,39 %.

За 2019–2020 гг. умерло 84 (7,92 %) пациента. От основного заболевания умерло 56 чел. (66,67 %) в возрасте 66–67 лет.

Ранняя диагностика рака является залогом улучшения качества жизни, увеличения продолжительности жизни пациентов и снижения смертности от злокачественных новообразований. Широкое внедрение скрининга РМЖ, повышение качества параллельных осмотров, информированность женщин о методиках регулярного самообследования молочных желез, своевременное обращение за медицинской помощью позволит улучшить результаты лечения данной патологии. Представленная нами информация является основой для поиска путей совершенствования ранней диагностики и профилактики РМЖ у жителей Витебской обл.

## Библиографические ссылки

1. Parkin DM, Bray F, Ferlay J. Global cancer statistics, 2002. *Cancer Journal Clinical*. 2005;55:74–108.
2. Океанов АЕ и др. *Рак в Беларуси: цифры и факты. Анализ данных Белорусского канцеррегистра за 2010–2019 гг.* Минск: РНПЦ ОМР им. Н. Н. Александрова; 2020. 298 с.
3. Globocan 2020 [Internet; cited 2021 April 1]. The Global Cancer Observatory. Available from: <https://gco.iarc.fr/today/data/factsheets/populations/112-belarus-fact-sheets.pdf>.
4. Стожаров АН. *Экологическая медицина*. Минск: МГМИ; 2000. 151 с.
5. Cohn BA, Wolff MS, Cirillo PM, Sholtz RI. DDT and breast cancer in young women: new data on the significance of age at exposure. *Environmental Health Perspectives*. 2007;115(10):1406–1414.
6. Kortenkamp A. Breast cancer, oestrogens and environmental pollutants: a re-evaluation from a mixture perspective. *International Journal of Andrology*. 2006;29:193–198.
7. Donovan M, Tiwary CM, Axelrod D, Sasco AJ, Jones L, Hajek R, Sauber E, Kuo J, Davis DL. Personal care products that contain estrogens or xenoestrogens may increase breast cancer risk. *Medical Hypotheses*. 2007;68(4):756–766.
8. Safe S, Papineni S. The role of xenoestrogenic compounds in the development of breast cancer. *Trends in Pharmacological Sciences*. 2006;27(8):447–454.
9. Brody JG, Rudel RA. Environmental pollutants and breast cancer. *Environmental Health Perspectives*. 2003;111(8):1007–1019.
10. Бадмаева ГС, Олоева ТТ, Перинов АП, Болошинов АБ. Экология и рак молочной железы в Бурятии. *Сибирский онкологический журнал*. 2002;3–4:29.
11. Lichtenstein P, Holm NV, Verkasalo PK, Iliadou A, Kaprio J, Koskenvuo M, Pukkala E, Skytthe A, Hemminki K. Environmental and heritable factors in the causation of cancer. Analyses of cohorts of twins from Sweden, Denmark and Finland. *New England Journal of Medicine*. 2000;343:78–85.
12. Shimizu H, Ross RK, Bernstein L, Yatani R, Henderson BE, Mack TM. Cancers of the prostate and breast among Japanese and white immigrants in Los Angeles County. *British Journal of Cancer*. 1991;63(6):963–966.
13. King MC, Marks JH, Mandell JB. Breast and ovarian cancer risks due to inherited mutations in BRCA1 and BRCA2. *Science*. 2003;302: 643–646.
14. Vallejos CS, Gómez LH, Cruz WR, Pinto JA, Dyer RR, Velarde R, Suazo JF, Neciosup SP, Mauricio L, de la Cruz MA, Vigil CE. Breast Cancer Classification According to Immunohistochemistry Markers: Subtypes and Association With Clinicopathologic Variables in a Peruvian Hospital Database. *Clinical Breast Cancer*. 2010;10(4):294–300.

## References

1. Parkin DM, Bray F, Ferlay J. Global cancer statistics, 2002. *Cancer Journal Clinical*. 2005;55:74–108.
2. Океанов АЕ, et al. *Рак в Беларуси: цифры и факты. Анализ данных канцеррегистра Беларуси за 2010–2019 года* [Cancer in Belarus: figures and facts. Analysis of the data of the Belarusian Cancer Registry for 2010–2019]. Minsk: RSPC OMR named after N. N. Aleksandrov; 2020. 298 p. Russian.
3. Globocan 2020 [Internet; cited 2021 April 1]. The Global Cancer Observatory. Available from: <https://gco.iarc.fr/today/data/factsheets/populations/112-belarus-fact-sheets.pdf>.
4. Stogharov AH. *Ekologicheskaja medicina* [Ecological medicine]. Minsk: MSMI; 2000. 151 p. Russian.
5. Cohn BA, Wolff MS, Cirillo PM, Sholtz RI. DDT and breast cancer in young women: new data on the significance of age at exposure. *Environmental Health Perspectives*. 2007;115(10):1406–1414.
6. Kortenkamp A. Breast cancer, oestrogens and environmental pollutants: a re-evaluation from a mixture perspective. *International Journal of Andrology*. 2006;29:193–198.
7. Donovan M, Tiwary CM, Axelrod D, Sasco AJ, Jones L, Hajek R, Sauber E, Kuo J, Davis DL. Personal care products that contain estrogens or xenoestrogens may increase breast cancer risk. *Medical Hypotheses*. 2007;68(4):756–766.
8. Safe S, Papineni S. The role of xenoestrogenic compounds in the development of breast cancer. *Trends in Pharmacological Sciences*. 2006;27(8):447–454.
9. Brody JG, Rudel RA. Environmental pollutants and breast cancer. *Environmental Health Perspectives*. 2003;111(8):1007–1019.
10. Badmaeva GS, Oloeva TT, Perinov AP, Boloshinov AB. Ecology and breast cancer in Buryatia. *Sibirskij onkologicheskij zhurnal* [Siberian journal of oncology]. 2002;3–4:29. Russian.
11. Lichtenstein P, Holm NV, Verkasalo PK, Iliadou A, Kaprio J, Koskenvuo M, Pukkala E, Skytthe A, Hemminki K. Environmental and heritable factors in the causation of cancer. Analyses of cohorts of twins from Sweden, Denmark and Finland. *New England Journal of Medicine*. 2000;343:78–85.
12. Shimizu H, Ross RK, Bernstein L, Yatani R, Henderson BE, Mack TM. Cancers of the prostate and breast among Japanese and white immigrants in Los Angeles County. *British Journal of Cancer*. 1991;63(6):963–966.
13. King MC, Marks JH, Mandell JB. Breast and ovarian cancer risks due to inherited mutations in BRCA1 and BRCA2. *Science*. 2003;302: 643–646.
14. Vallejos CS, Gómez LH, Cruz WR, Pinto JA, Dyer RR, Velarde R, Suazo JF, Neciosup SP, Mauricio L, de la Cruz MA, Vigil CE. Breast Cancer Classification According to Immunohistochemistry Markers: Subtypes and Association With Clinicopathologic Variables in a Peruvian Hospital Database. *Clinical Breast Cancer*. 2010;10(4):294–300.

---

---

# ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

---

## INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

---

---

УДК 338.3:[651.012:67.02](075.8)

### ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПО МАКСИМАЛЬНОМУ ВОВЛЕЧЕНИЮ ОТХОДОВ КОНДИТЕРСКИХ ПРОИЗВОДСТВ В ХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ОБОРОТ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Е. А. УЛАЩИК<sup>1)</sup>, В. М. МИСЮЧЕНКО<sup>1)</sup>, А. Д. НИКИТИЧ<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

Отходами кондитерского производства в Республике Беларусь на данный момент являются яичная скорлупа, продукты питания (испорченные, загрязненные), содержащие вредные пищевые добавки. На основе статистических данных было установлено, что общее количество образованных отходов кондитерского производства и яичной скорлупы с 2015 по 2020 г. увеличилось на 86,6 %. Отходы кондитерских производств в нашей стране в настоящее время практически не перерабатываются и поступают на захоронение на полигон в составе коммунальных отходов, увеличивая загрязнение окружающей среды. Поэтому появилась экономически, технологически

---

#### Образец цитирования:

Улащик ЕА, Мисюченко ВМ, Никитич АД. Внедрение технологии по максимальному вовлечению отходов кондитерских производств в хозяйственный оборот Республики Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;1:75–83.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-75-83>

#### For citation:

Ulashchik EA, Misiuchenka VM, Nikitich AD. Justification of technology for the maximum involvement of waste from confectionery productions in the economic turnover in the Republic of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;1:75–83. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-75-83>

---

#### Авторы:

**Екатерина Александровна Улащик** – аспирант кафедры экологического мониторинга и менеджмента.  
**Виктория Мечеславовна Мисюченко** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; доцент кафедры экологического мониторинга и менеджмента.  
**Анастасия Дмитриевна Никитич** – студентка кафедры экологического мониторинга и менеджмента.

#### Authors:

**Ekaterina A. Ulashchik**, graduate student at the department of environmental monitoring and management.  
[ulasikekaterina@gmail.com](mailto:ulasikekaterina@gmail.com)  
**Viktoryia M. Misiuchenka**, PhD (agriculture) science, docent; associate professor at the department of environmental monitoring and management.  
[vi925@mail.ru](mailto:vi925@mail.ru)  
**Anastasya D. Nikitich**, student of faculty of environmental monitoring.  
[anastasianikitic@gmail.com](mailto:anastasianikitic@gmail.com)

и экологически обоснованная необходимость в разработке рекомендаций по управлению отходами кондитерского производства.

На примере одного из крупнейших кондитерских предприятий Республики Беларусь было исследовано и обосновано применение технологического оборудования – установки барабанной сушилки с целью переработки отходов скорлупы яичной. Для получения качественного сырья (муки скорлупы яичной) основным параметром установок является возможность поддержания высоких температур. Эта характеристика послужила основным параметром выбора барабанной установки. Расчеты показали, что затраты на сбор и передачу отходов предприятиям-переработчикам значительно меньше, чем стоимость оборудования барабанной сушилки. Такие установки требуют дооборудования различными дорогостоящими комплектующими. Кроме того, были учтены расходы на подготовку площадки, на которой будет установлено оборудование, а также проводиться пуско-наладочные работы, регулярное санитарно-техническое обслуживание, технические осмотры и ремонт установок.

Учитывая объемы образования данных отходов на предприятиях и в целом по республике, для нашего государства не целесообразно производить индивидуальную переработку этих отходов внутри производства. Рекомендуется передавать отходы скорлупы яичной на переработку сторонним специализированным предприятиям. Данное решение поможет сократить объемы передаваемых отходов скорлупы яичной на объекты захоронения, а также позволит предприятиям-переработчикам окупать установки по ее переработке за счет реализации полученной продукции.

**Ключевые слова:** отходы кондитерской промышленности; повторное использование; отходы скорлупы яичной; сушильная установка; яичная мука.

## JUSTIFICATION OF TECHNOLOGY FOR THE MAXIMUM INVOLVEMENT OF WASTE FROM CONFECTIONERY PRODUCTIONS IN THE ECONOMIC TURNOVER IN THE REPUBLIC OF BELARUS

*E. A. ULASHCHIK<sup>a</sup>, V. M. MISIUCHENKA<sup>a</sup>, A. D. NIKITICH<sup>a</sup>*

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

*Corresponding author: E. A. Ulashchik (ulasikekaterina@gmail.com)*

Wastes of confectionery production in the Republic of Belarus at the moment are egg shells, spoiled, contaminated food, food containing harmful food additives. Based on the statistical data of the Republic of Belarus, it was found that the total amount of waste generated by the confectionery industry and eggshell from 2015 to 2020 increased by 86,6 %. These generated wastes of confectionery production in our country are currently practically not processed and are sent to a landfill as part of municipal waste, thus increasing environmental pollution. Therefore, there was an economically, technologically and environmentally justified need to develop recommendations for the management of confectionery waste.

On the example of one of the largest confectionery enterprises of the Republic of Belarus, the use of technological equipment was investigated and justified – a drum dryer for processing eggshell waste. To obtain high-quality raw materials (eggshell flour), the main parameter of the plants is the ability to maintain high temperatures. This characteristic served as the main parameter for choosing a drum set. Calculations have shown that the cost of collecting and transferring waste to processing enterprises is much less than the cost of drum dryer equipment alone. Also, such installations require additional equipment with various expensive components. In addition, the cost of preparing the site on which the equipment will be installed, commissioning and regular sanitary maintenance with regular technical inspections and repairs of the installation were taken into account.

Considering the volumes of generation of these wastes at enterprises and in the whole country, it is not advisable for the enterprises of our state to carry out individual processing of these wastes within production. It is recommended to transfer egg shell waste for processing to third-party specialized enterprises. This decision will help reduce the amount of eggshell waste transferred to landfill sites, and will also allow processors to pay for shell processing plants by selling the resulting products.

**Keywords:** confectionery waste; reuse; egg shell waste; drying plant; egg flour.

### Введение

Пищевая промышленность – одна из важных отраслей промышленности Республики Беларусь, которая в 2020 г. занимала 25,9 % в общем объеме промышленного производства (рис. 1)<sup>1</sup>. По белорусской классификации, к пищевой промышленности относятся такие виды экономической деятельности, как производство продуктов питания, напитков (алкогольных и безалкогольных) и табачных изделий<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Требования к обращению с отходами производства и потребления // Постановление Министерства Здравоохранения Республики Беларусь 30 декабря 2016 г. № 143 [Электронный ресурс]. URL: [https://pravo.by/upload/docs/op/W21731725p\\_1486501200.pdf](https://pravo.by/upload/docs/op/W21731725p_1486501200.pdf) (дата обращения: 17.10.2021).

<sup>2</sup>Пищевая промышленность Белоруссии / Википедия (Wikipedia) [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Пищевая\\_промышленность\\_Белоруссии](https://ru.wikipedia.org/wiki/Пищевая_промышленность_Белоруссии) (дата обращения: 17.10.2021).

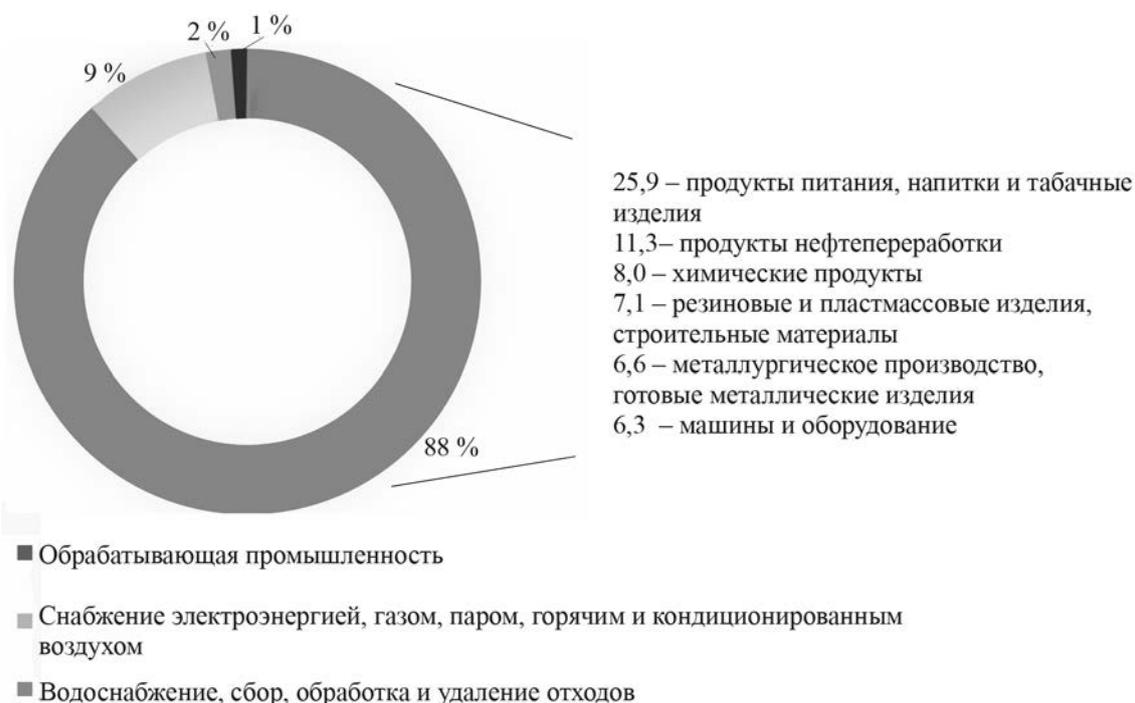


Рис. 1. Структура объема промышленного производства в 2020 г., %

Fig. 1. Structure of industrial production in 2020, %

Кондитерская промышленность – одна из наиболее доходных и динамично развивающихся пищевых отраслей любого европейского государства. Белорусская кондитерская промышленность представлена 20 предприятиями: 8 из них входит в государственный концерн «Белгоспищепром», предприятиями и цехами коммунальной собственности, а также владельцами которых являются иностранные предприниматели.

Образование отходов производства в Беларуси, как и в других странах мира, является актуальной проблемой. В динамике образования отходов сохранилась характерная положительная тенденция по мере экономического развития, увеличивалась цифра накопленных отходов на предприятиях, которые практически не используются и наносят непоправимый ущерб нашей окружающей среде.

При производстве любых кондитерских изделий на большинстве стадий технологического процесса образуются отходы в виде остатков сырья, полуфабрикатов и готовых изделий (рис. 2).

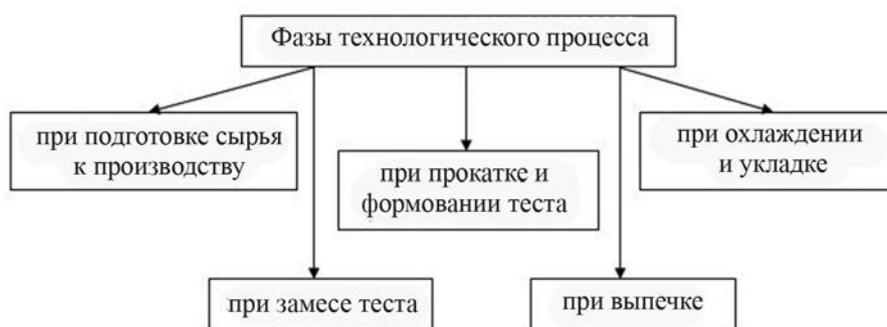


Рис. 2. Этапы технологического процесса кондитерского производства, на которых могут образовываться отходы

Fig. 2. Stages of the technological process of confectionery production at which waste can be generated

Они делятся на используемые и неиспользуемые отходы. Основным критерием для возможности повторного использования остатков сырья и продукции является соответствие санитарным нормам и характеристикам, а также гигиеническим требованиям по производству и переработке пищевой продукции Республики Беларусь [1]. Именно поэтому отходы могут быть повторно использованы только в том случае, если они являются санитарно доброкачественными.

## Материалы и методы исследования

Для анализа образования и переработки отходов нами проанализированы статистические данные БелНИЦ «Экология» об обращении с просроченными и испорченными продуктами питания и скорлупой яичной за 2020 г.<sup>3</sup>

Для сокращения объемов отходов, направляющихся на захоронение, нами проведены исследования возможных технологий переработки отходов кондитерских производств в Республике Беларусь. Патентный поиск осуществлялся на базе Республиканской научно-технической библиотеки.

Кроме того, проведен литературный анализ исследований использования отходов скорлупы яичной, в ходе которого были определены основные направления ее переработки [1].

## Результаты исследования и их обсуждение

Графика использования просроченных и испорченных продуктов питания и отходов скорлупы яичной за 2020 г. имеет почти такой же вид, как и их образование (табл. 1).

Таблица 1

Анализ образования и движения кондитерских отходов в 2020 г., тыс. т

Table 1

Analysis of the formation and movement of confectionery waste in 2020, thousand tons

Название отхода	Всего образовалось отходов за год, тыс. т	Использовано, передано, реализовано отходов за год
Просроченные продукты питания	0,5	0,5
Продукты питания испорченные, загрязненные или немаркированные	33,1	33,2
Отходы скорлупы яичной	1,4	1,4

Общее количество образованных отходов с каждым годом увеличивается, сопровождаясь пропорциональным ростом объемов их использования. Таким образом, общее количество образованных отходов кондитерского производства и яичной скорлупы с 2015 по 2020 г. увеличилось на 86,6 %. Процент захоронения таких отходов составляет в среднем от 3–5 %.

Санитарно-доброкачественные отходы используются внутри производства путем возврата их на предыдущие стадии обработки или же они идут в другие сорта продукции.

1. Тесто, приготовленное с нарушением технологического режима или рецептуры (затянувшееся подсыхшее, слишком жидкое или крутое и т. п.), используется в производстве путем частичного добавления к свежему приготавливаемому тесту.

2. Получаемые в процессе производства ломаные и деформированные изделия, а также обрезки и крошки изделий предварительно измельчаются или разминаются, а затем добавляются в тестомесильную машину при замесе теста в количестве и сортах, предусмотренных рецептурами. Крошки, лом и обрезки вафель размалываются в однородную массу с добавлением разогретого жира и используются при изготовлении вафельных начинок.

Неиспользуемые отходы – смет с пола, выбой из мешков, загрязненная крошка, полученная при зачистке трафаретов — являются санитарно-недоброкачественными отходами и в производстве не используются. Они полностью передаются на соответствующие полигоны для захоронения.

Количество отходов, поступивших на захоронение, для анализа представлено в табл. 2.

Ссылаясь на данные вышеуказанных таблиц, можно проследить тенденцию увеличения использования кондитерских отходов от общего объема образования с соответственным уменьшением передачи их на объекты захоронения (рис. 3).

<sup>3</sup>Сведения об объемах образования, хранения, захоронения, обезвреживания и использования отходов производства по видам отходов, классам опасности, в том числе крупнотоннажных (галитовых отходов и глинисто-солевых шламов, фосфогипса), в разрезе административно-территориальных единиц // Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие «Бел НИЦ «Экология»». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ecoinfo.by/content/2399.html> (дата обращения: 17.10.2021).

Объем отходов, поступивших на захоронение в 2015 и 2020 гг., тыс. т

Table 2

Waste volume received for disposal since 2015 and 2020, thousand tons

Название отхода	2015 г.	2017 г.	2019 г.	2020 г.
Просроченные продукты питания	0,439	0,574	0,281	0,000
Продукты питания испорченные, загрязненные	1,948	1,637	1,385	1,500
Отходы скорлупы яичной	0,000	0,092	0,005	0,100

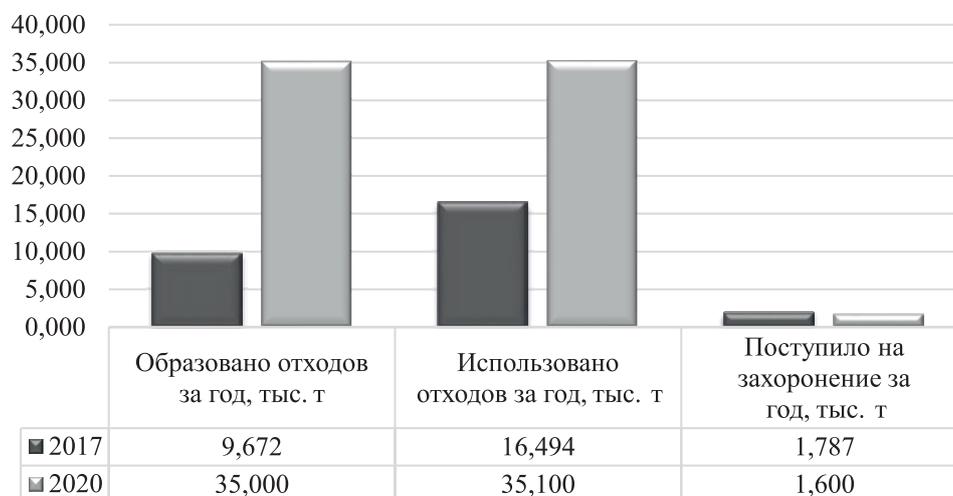


Рис. 3. Соотношение количества образования кондитерских отходов к количеству их использования и захоронения в целом по Беларуси за 2017 и 2020 гг., тыс. т

Fig.3. The ratio of the amount of formation of confectionery waste to the amount of their use and disposal in Belarus as a whole for 2017 and 2020, thousand tons

Анализируя полученные данные, можно подвести общий итог, что по всем видам за рассматриваемый период количество использованных отходов возросло больше чем на 50 % от количества образовавшихся, а использование яичной скорлупы в 2020 г. достигло 100 % количества образовавшихся.

В отношении захоронения и хранения анализируемых отходов можно сделать следующие выводы: в целом за рассматриваемый период процент захоронения яичной скорлупы составляет до 1%.

Патентный поиск осуществлялся на базе Республиканской научно-технической библиотеки. В ходе работы было установлено, что переработка кондитерских изделий является узконаправленной и всегда сопряжена с переработкой иных отходов, а также кондитерские изделия не являются основным объектом переработки. Как правило, такая переработка не является крупномасштабной, а наиболее актуальные патенты принадлежат таким странам, как Китай и Корея.

Для разработки мероприятий по совершенствованию обращения с отходами кондитерских производств был проведен анализ международной патентной базы по использованию кондитерских отходов. Анализ свидетельствует, что наиболее перспективными изобретениями для переработки отходов кондитерской промышленности являются:

- сушилки пищевых отходов разных конструкций, позволяющие повторно использовать отходы для производства новой продукции;
- интегрированный метод компостирования органических отходов с возможностью получения побочного продукта переработки отходов – биогаз.

Переработанная яичная скорлупа может повторно использоваться в качестве биологически активной добавки при приеме пищи, в производстве зефирной массы, лечебных и профилактических целях за счет использования минерального комплекса яичной скорлупы в виде солей органических кислот, в качестве добавок в зубные пасты и порошки. Основное направление использования яичной скорлупы в настоящее время – добавки при производстве кормовых добавок и комбикорма.

Но для возможности повторного использования скорлупы ее моют, стерилизуют, сушат и измельчают. Причем измельчение проводят в два этапа. На первом этапе проводят грубый помол до размера частиц

2–4 мм с последующим отделением органической пленки при влажности 5–7 %, а на втором – размалывают массу до размера частиц 20–30 мкм и дополнительно подвергают ее сушке до содержания влаги 1–4 % с образованием мелкодисперсного порошка в виде муки. Допустимое содержание влаги полученного продукта не должно превышать более 4 %, остаток частиц с диаметром 3 мм не более 5 %. Для этого чаще всего используют барабанные сушильные установки (рис. 4).

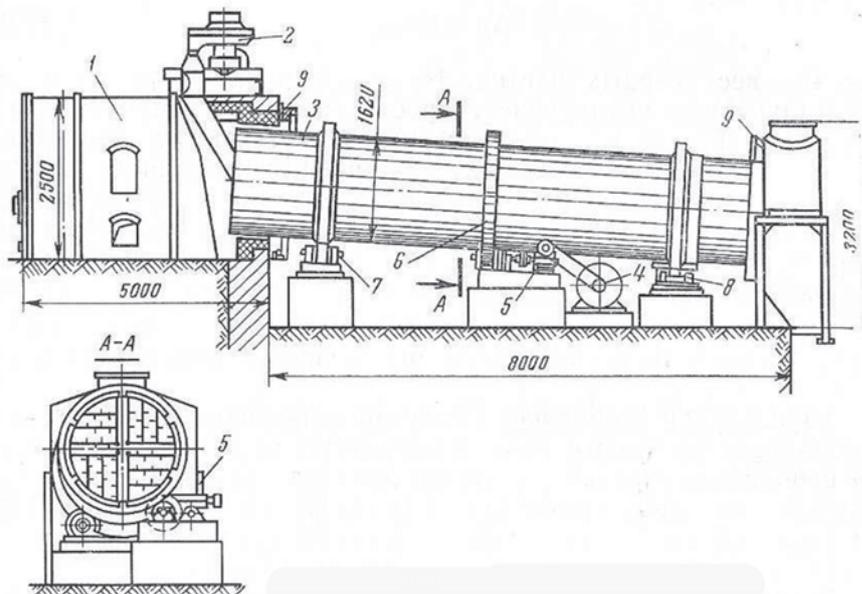


Рис. 4. Барабанная сушилка

Fig. 4. Drum dryer

Для возможности внедрения был произведен расчет эколого-экономической эффективности капитальных затрат на установку оборудования. Основой послужила методика расчета эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий [2].

Для примера возьмем типовую барабанную сушильную установку типа С-0,15, поскольку ее характеристики наиболее соответствуют необходимым вышеописанным критериям получаемого конечного сырья (яичный порошок, мука)<sup>4</sup>.

Стоимость оборудования составляет 15555 долл. США. В капитальные расходы входит: стоимость основного оборудования, строительные работы (затраты на строительство) и санитарно-технические работы (30 %), стоимость дополнительно-обслуживаемых объектов (контейнеры).

Расчет капитальных затрат представлен в табл. 3.

Таблица 3

**Расчет капитальных затрат на строительство сооружения**

Table 3

**Calculation of capital costs for the construction of the facility**

Затраты	Объем строительных работ, м <sup>2</sup>	Стоимость 1м <sup>2</sup> строительства сооружения, бел. руб.	Общая стоимость строительства, бел. руб.
Строительные работы, затраты на строительство	10	400	4000
Санитарно-технические работы (30 %)	–	–	≈ 11899,6*
Стоимость оборудования	–	–	≈ 39665,25*
Контейнеры объемом 360 л	–	–	800
Всего капитальных затрат	–	–	56364,95

Примечание. Переведено по курсу \$ (США) на конец 2021 г., что составил 2,55 бел. руб.

<sup>4</sup>Барабанная сушилка для щепы, песка и сыпучих материалов – промышленный сушильный барабан / Ассоциация предприятий БМП [Электронный ресурс]. URL: <https://bmpa.ru/barabannaya-sushilka-dlya-shchepy-i-sypuchih-materialov> (дата обращения: 17.10.2021).

Определим ежемесячные нормы амортизационных отчислений:

1. Рассчитаем годовую норму амортизации:

$$100 \% / 10 \text{ лет} = 10 \%$$

Следовательно, 10 % стоимости будет ежегодно уходить в счет погашения стоимости оборудования и за 10 лет она полностью будет списана.

2. Определим годовую сумму амортизационных отчислений:

$$39665,25 \cdot 10 \% = 3966,53 \text{ бел. руб.}$$

то есть ежегодно в счет амортизации будут списываться 3966,53 руб., что за 10 лет покрывает всю сумму приобретения данного оборудования.

Текущие затраты – 12 236,89 руб. (текущий ремонт – 0,2 % стоимости оборудования – 79 руб., технологический уход – 0,2 % стоимости оборудования – 79 руб., амортизационные отчисления – 3966,53 руб., заработная плата рабочих – 5017,68 руб., затраты на электроэнергию – 3094,68).

Рассчитаем экономический результат по формуле:

$$P = H (\text{платёж предприятия за хранение отходов}) - \text{текущие затраты} + D (\text{доход})$$

Налоговая ставка за хранение 1 т неопасных отходов предприятием составляет 1,24 бел. руб.

Средний объем образованных отходов (тонн в год) за период 5 лет на примере нашего предприятия составил 4,36 т/г.

$$H_{\text{скорлупы}} = 4,36 \cdot 1,24 = 5,41 \text{ бел. руб.},$$

Масса скорлупы одного яйца составляет около 10 % от массы яйца и равна 5 г.

При этом при сушке и дроблении скорлупы теряется около 20 % объема массы. Поэтому из скорлупы одного яйца массой 5 г получается около 4 г яичного порошка.

Следовательно, объем полученного порошка из годового объема образования отходов скорлупы яичной составит:

$$V_{\text{год}} = 4,36 - 20 \% = 3,488 \text{ т/порошка.}$$

Цена за 1 кг яичного порошка составляет 5 б.р. Годовой доход от продажи яичного порошка составит:

$$D = 3488 \cdot 5 = 17440 \text{ бел. руб.}$$

$$P (\text{всего}) = 5,41 - 12 236,89 + 17440 = 5208,52 \text{ бел. руб.}$$

Экономическая эффективность рассчитаем по формуле  $Эк = P / \text{капитальные затраты}$ :

$$Эк = 5208,52 / 56364,95 = 0,092.$$

Простой срок окупаемости – величина, обратная экономической эффективности составляет:

$$T_{\text{п}} = 56364,95 / 5208,52 = 10,8 \text{ г.}$$

Согласно приведенным нами данным по текущим затратам предприятия, можно сказать, что установка барабанной сушилки типа С-0,15, как и других сушильных установок, которые могут обеспечить надлежащее качество переработанного сырья (муки скорлупы яичной), нерентабельна.

К сожалению, для получения качественного сырья (муки скорлупы яичной) основным параметром установок является возможность поддержания высоких температур с одновременным размалыванием массы до размера частиц 20–30 мкм, поскольку влажность получаемого сырья (яичная мука) не должна превышать более 4 %, остаток частиц с диаметром 3 мм не более 5 %. Такие возможности присущи не всем установкам, многие из которых зачастую требуют дооборудования различными дорогостоящими комплектующими. Но это только часть расходов. Необходимо также учитывать расходы на подготовку площадки, на которой будет установлено оборудование, пуско-наладочные работы и регулярное санитарно-техническое обслуживание с проведением регулярных технических осмотров и ремонта установки. Необходимо учесть энергозатраты, оплату труда работников, проведения работ по контролю пожарной безопасности и т. д.

Исходя из вышеизложенного, принято решение произвести перерасчет затрат предприятия с учетом продажи отходов скорлупы яичной предприятиям-переработчикам, без установки данного оборудования на своем предприятии.

Основные затраты будут состоять из установки контейнеров для отдельного сбора отходов и на транспортировку к организациям-переработчикам.

Согласно прейскуранту, в среднем стоимость транспортных услуг за вывоз отходов с территории предприятия составляет около:

$$\text{Скорлупа яичная} - 100 \text{ руб.}, \text{ цена за 1 т (без НДС).}$$

Находим расход денежных средств, необходимых для перевозки отходов образованных за год:

$$Z_{\text{пер.}} (\text{скорлупа яичная}) = 4,36 \cdot 100 = 436 \text{ руб/год.}$$

На предприятии необходимо установить 5 отдельных контейнера для отдельного сбора, объемом 360 л и стоимостью 160 бел. руб. за один контейнер.

$$Z_{\text{конт.}} (\text{скорлупа яичная}) = 5 \cdot 160 = 800 \text{ руб/год.}$$

Закупочная цена предприятиями-переработчиками за 1 кг отходов скорлупы составляет  $\approx 1$  бел. руб. Годовой доход предприятия от продажи скорлупы составит:

$$D_{\text{продажа}} = 1 \cdot 4360 = 4360 \text{ бел. руб/год.}$$

Итоговые затраты предприятия при сборе и дальнейшей продаже отходов составят:

$$Z = Z_{\text{конт.}} + Z_{\text{пер}} = 800 + 436 = 1236 \text{ бел. руб/год.}$$

Доход предприятия от продажи скорлупы яичной предприятиям-переработчикам с учетом сопутствующих расходов составит:

$$D_{\text{предпр}} = 4360 - 1236 = 3124 \text{ бел. руб/год.}$$

Поскольку объемы образованных отходов скорлупы яичной на отдельно взятом предприятии малы, то нет острой необходимости в ее переработке и повторном использовании. Данные отходы неопасны, тем самым не несут вреда окружающей среде или же здоровью человека, напротив, являясь полезным веществом, в подсобных хозяйствах используется в качестве удобрения.

При данном методе использования отходов предприятие потерпит минимальные затраты на сбор отходов, при этом получит регулярную прибыль от передачи отходов на переработку.

В Реестре объектов по использованию отходов Республики Беларусь прием и переработку отходов кондитерской промышленности от сторонних организаций осуществляют различные организации, располагающиеся в каждой области Республики Беларусь. Это позволяет предприятиям кондитерской промышленности по всей республике беспрепятственно передавать свои отходы для их последующей переработки<sup>5</sup>.

Кроме того, согласно статье № 3 Закона от 20.07.2007 № 271-З «Об обращении с отходами», при отсутствии у субъекта хозяйствования возможности использовать и (или) обезвреживать образующиеся у него отходы, он обязан передать (отчуждать) данные отходы другим субъектам хозяйствования, зарегистрированным в Реестре объектов по использованию отходов Республики Беларусь. И только при отсутствии действующих на территории РБ объектов по использованию, обезвреживанию и подготовке образованных отходов, субъекты хозяйствования могут подать в территориальный орган Минприроды заявление для выдачи разрешения на захоронение отходов производства<sup>6</sup>.

## Заключение

При производстве любых кондитерских изделий образуются отходы в виде остатков сырья, полуфабрикатов и готовых изделий на большинстве стадий технологического процесса. Отходами кондитерского производства в Республике Беларусь на данный момент являются яичная скорлупа, продукты питания испорченные, загрязненные, содержащие вредные пищевые добавки. Образование отходов кондитерского производства и яичной скорлупы с 2015 по 2020 г. увеличилось на 86,6 %.

На основании литературного анализа определены направления использования яичной скорлупы как источника натурального кальция: в качестве биологически активной добавки при приеме пищи, в производстве зефирной массы, в лечебных и профилактических целях за счет использования минерального комплекса яичной скорлупы в виде солей органических кислот, в качестве добавок в зубные пасты и порошки. Основное направление использования яичной скорлупы в настоящее время – добавки при производстве кормовых добавок и комбикорма.

Анализ международной патентной базы по использованию кондитерских отходов свидетельствует, что наиболее перспективными изобретениями для переработки отходов кондитерской промышленности являются:

- сушилки пищевых отходов разных конструкций, позволяющие повторно использовать отходы для производства новой продукции;
- интегрированный метод компостирования органических отходов с возможностью получения побочного продукта переработки отходов – биогаз.

В связи с этим было исследовано и обосновано на примере одного из кондитерских предприятий Республики Беларусь применение технологического оборудования – установки барабанной сушилки для переработки отходов скорлупы яичной. Основным параметром для нее является поддержание высоких

<sup>5</sup>Реестры объектов по использованию, обезвреживанию, захоронению и хранению отходов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ecoinfo.by/content/2422.html> (дата обращения: 17.10.2021).

<sup>6</sup>Закон Республики Беларусь от 20.07.2007 N 271-З (ред. от 13.07.2016) «Об обращении с отходами» [Электронный ресурс]. URL: [https://belzakon.net/Законы/Закон\\_РБ\\_Об\\_обращении\\_с\\_отходами/Статья\\_1](https://belzakon.net/Законы/Закон_РБ_Об_обращении_с_отходами/Статья_1) (дата обращения: 17.10.2021).

температур. Расчеты показали, что затраты на сбор и передачу отходов предприятиям-переработчикам значительно меньше, чем только стоимость оборудования барабанной сушилки. Поэтому дальнейшие расчеты эколого-экономической эффективности по установке и обслуживанию оборудования принято считать нецелесообразными на основании методики расчета эколого-экономической эффективности. На основании наших исследований рекомендуем передавать отходы скорлупы яичной на переработку сторонним специализированным предприятиям.

Данное решение поможет сократить объемы передаваемых отходов скорлупы яичной на объекты захоронения, а также позволит предприятиям-переработчикам окупать установки по ее переработке за счет реализации полученной продукции как различным организациям по использованию муки скорлупы яичной, так и физическим лицам в качестве минерального удобрения.

### Библиографические ссылки

1. Никитич АД, Улащик ЕА. *Направления переработки отходов кондитерских производств в Республике Беларусь. В: Экологическая безопасность 1991–2021. Материалы заочной научно-практической конференции, посвященной юбилейной дате образования РУП «БелНИЦ «Экология».* Минск: [б. и.]; 2021. с. 134–137.
2. Неверов АВ, Водопьянова ТП. *Экономика природопользования.* Минск: БГТУ; 2019. 116 с.

### References

1. Nikitich AD, Ulashchik EA. *Napravleniya pererabotki otkhodov konditerskikh proizvodstv v Respublike Belarus* [Directions of waste processing of confectionery production in the Republic of Belarus]. In: *Ecological safety 1991–2021. Materials of the correspondence scientific and practical conference dedicated to the anniversary date of the formation of RUE «BelNITS “Ecology”* / RUE «BelNITS “Ecology”». Minsk: [publisher unknown]; 2021. p. 134–137. Russian.
2. Neverov AV, Vodopyanova TP. *Ekonomika prirodopolzovaniya* [Economics of nature management]. Minsk: BSTU; 2019. 116 p. Russian.

*Статья поступила в редколлегию 02.02.2022.  
Received by editorial board 02.02.2022.*

УДК 631.811:631.472.56:361.4592:31.445.24(476)

## ПОТЕРИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ ПРИ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ НА СКЛОНОВЫХ ЗЕМЛЯХ

Н. Н. ЦЫБУЛЬКО<sup>1)</sup>, И. И. ЖУКОВА<sup>2)</sup>, А. В. ЮХНОВЕЦ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси  
ул. Казинца, 90, 220108, г. Минск, Беларусь

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

Представлены результаты многолетних исследований смыва гумуса и элементов питания растений с водной эрозией на дерново-подзолистых почвах. Установлены количественные показатели потерь их с жидким и твердым стоком при весеннем снеготаянии и выпадении стокообразующих дождей под разными сельскохозяйственными культурами.

При весеннем снеготаянии максимальный сток наблюдался на посевах озимых зерновых, максимальный смыв почвы – на зяблевой вспашке. Гумус, азот, фосфор и калий теряются в основном с твердым стоком. В период весеннего снеготаяния суммарные потери гумуса, азота, фосфора и калия составляют: на зяблевой вспашке 80,4, 5,4, 2,3 и 2,1 кг/га в год, на озимых зерновых культурах – 28,6, 1,7, 0,7 и 0,6 кг/га в год, под многолетними травами – 5,3, 0,2, 0,2 и 0,9 кг/га в год соответственно.

Максимальный сток и смыв почвы в период выпадения стокообразующих дождей наблюдался под пропашными культурами, минимальный – под многолетними травами. Основные потери гумуса, азота и фосфора под пропашными и яровыми зерновыми культурами отмечаются с твердым стоком. Под многолетними травами гумус больше смывается с жидким, а азот и фосфор – в равных количествах с жидким и твердым стоком. Калий в основном выносится с почвой на пропашных культурах, а на озимых зерновых культурах – с жидким стоком. На яровых зерновых культурах и многолетних травах его потери с жидким и твердым стоком одинаковые.

В целом при возделывании пропашных культур потери гумуса с водной эрозией достигают 240 кг/га в год, под яровыми зерновыми и зернобобовыми культурами – 8–170, под озимыми зерновыми – 25–45 кг/га в год, а под многолетними травами не более 10 кг/га. Общие потери азота колеблются от 12,5–46,0 кг/га под пропашными культурами до 1,5–5,0 кг/га под озимыми зерновыми культурами. Потери фосфора и калия составляют 4,5–,0 кг/га в год на пропашных культурах, 3,5–15,0 – на яровых зерновых и зернобобовых культурах, 1,5–7,0 – на озимых зерновых культурах и менее 2 кг/га в год на многолетних травах.

**Ключевые слова:** водная эрозия; жидкий сток; смыв почвы; потери; гумус; азот; фосфор; калий.

### Образец цитирования:

Цыбулько НН, Жукова ИИ, Юхновец АВ. Потери органического вещества и элементов питания при водной эрозии почв на склоновых землях. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;1:84–93.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-84-93>

### For citation:

Tsybulka MM, Zhukova II, Yukhnovets AV. Loss of organic matter and nutrients at soil water erosion on slope lands. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;1:84–93. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-84-93>

### Авторы:

**Николай Николаевич Цыбулько** – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; заместитель директора по научной работе.

**Инна Ивановна Жукова** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий кафедрой общей биологии и ботаники.

**Аксана Викентьевна Юхновец** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; ученый секретарь.

### Authors:

**Mikalai M. Tsybulka**, doctor of science (agriculture), full professor; deputy director for research.

[nik.nik1966@tut.by](mailto:nik.nik1966@tut.by)

**Inna I. Zhukova**, PhD (agriculture), docent; head of the department of general biology and botany .

[inn0707@bspu.by](mailto:inn0707@bspu.by)

**Aksana V. Yukhnovets**, PhD (agriculture), docent; scientific secretary.

[brissa\\_secretary@mail.ru](mailto:brissa_secretary@mail.ru)

## LOSS OF ORGANIC MATTER AND NUTRIENTS AT SOIL WATER EROSION ON SLOPE LANDS

M. M. TSYBULKA<sup>a</sup>, I. I. ZHUKOVA<sup>b</sup>, A. V. YUKHNOVETS<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus,  
90 Kazinisa Street, Minsk 220108, Belarus*

<sup>b</sup>*Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank,  
18 Saveckaja Street, Minsk 220030, Belarus  
Corresponding author: M. M. Tsybulka (nik.nik1966@tut.by)*

The results of long-term studies of the flushing of humus and plant nutrition elements with water erosion on sod-podzolic soils are presented. Quantitative indicators of their losses with liquid and solid runoff during spring snowmelt and precipitation of runoff-forming rains under different agricultural crops have been established.

During the spring snowmelt, the maximum runoff was observed on winter grain crops, the maximum soil washout was observed on winter plowing. Humus, nitrogen, phosphorus and potassium are lost mainly with solid runoff. During the spring snowmelt, the total losses of humus, nitrogen, phosphorus and potassium are 80.4, 5.4, 2.3 and 2.1 kg/ha per year, respectively, on winter crops – 28.6, 1.7, 0.7 and 0.6 kg/ha per year, under perennial grasses – 5.3, 0.2, 0.2 and 0.9 kg/ha per year.

The maximum runoff and flushing of the soil during the fallout of runoff-forming rains was observed under row crops, the minimum – under perennial grasses. The main losses of humus, nitrogen and phosphorus under row and spring grain crops are noted with solid runoff. Under perennial grasses, humus is washed off more with liquid, and nitrogen and phosphorus – in equal amounts with liquid and solid runoff. Potassium is mainly carried out with the soil on row crops, and on winter cereals – with liquid runoff. On spring grain crops and perennial grasses, its losses with liquid and solid runoff are the same.

In general, when cultivating row crops, humus losses with water erosion reach 240 kg/ha per year, under spring grain and leguminous crops – 8–170, under winter grain – 25–45 kg/ha per year, and under perennial grasses no more than 10 kg/ha. Total nitrogen losses range from 12.5–46.0 kg/ha under row crops to 1.5–5.0 kg/ha under winter grain crops. Phosphorus and potassium losses amount to 4.5–20.0 kg/ha per year on row crops, 3.5–15.0 – on spring cereals and leguminous crops, 1.5–7.0 – on winter cereals and less than 2 kg/ha per year on perennial grasses.

**Keywords:** water erosion; liquid runoff; soil runoff; losses; humus; nitrogen; phosphorus; potassium.

### Введение

В Беларуси установлено более 20 видов и форм деградации почвенно-земельных ресурсов и основной из них является эрозия почв. Эрозия почв, обусловленная чрезвычайно сложным комплексом геоморфологических, климатических, почвенных условий и хозяйственным использованием земель, проявляется на территории республики во всех видах и разновидностях. Водная эрозия, вызываемая тальми водами и ливневыми осадками, проявляется на склонах в виде смыва верхней части почвенного покрова (плоскостная и струйчатая эрозия) или в виде размыва в глубину (линейная эрозия). Уже на склонах 1–2 градуса проявляется плоскостная эрозия. С возрастом крутизны она усиливается, увеличивает ложбинность полей, перерастает в линейную эрозию.

Водной эрозии подвержено 473,3 тыс. га сельскохозяйственных земель. Эродированные почвы приурочены преимущественно к пахотным землям. Из общей площади почв, подверженных водной эрозии, 268,3 тыс. га (56 %) – слабоэродированные, 120,0 тыс. га (25 %) – среднеэродированные, 20,2 тыс. га (4 %) – сильноэродированные и 64,7 тыс. га (14 %) – намытые почвы [1].

С количественной стороны процесс эрозии почв характеризуются интенсивностью смыва, выражаемой в тоннах/гектар/год, либо мощностью утраченного слоя почвы в единицу времени (миллиметр/год). Для большинства пахотных почв категории слабоэродированных соответствует снос верхних слоев мощностью от 5 до 15–20 см, среднеэродированных – от 15–20 до 60 см, а категории сильноэродированных – более 50–60 см [2].

Дерново-подзолистые почвы, подверженные водной эрозии, под влиянием смыва части пахотного слоя и вовлечения иллювиального горизонта, имеют не только низкое содержание гумуса и общего азота, но и повышенную кислотность и меньшую емкость поглощения, подвижных соединений фосфора и калия [3; 4].

Цель исследования – установление количественных параметров потерь органического вещества (гумуса), азота, фосфора и калия из дерново-подзолистых почв с водной эрозией в период весеннего снеготаяния и выпадения стокообразующих дождей под разными сельскохозяйственными культурами.

### Материалы и методы исследований

Исследования проводили в 2000–2015 гг. на стационарных стоковых площадках, расположенных на выпуклом склоне южной экспозиции с крутизной 5–7°. Постоянные стоковые площадки заложены по

почвенно-геоморфологическому профилю от водораздельной равнины до подножья склона. Длина каждой площадки или длина линии стока – 60 м, ширина – 12 м, общая площадь одной площадки – 720 м<sup>2</sup>. Стоковая площадка представляет собой изолированный от окружающей местности прямоугольный участок склона, огражденный по контуру, за исключением нижней стороны, бортиками высотой 25–30 см и оборудованный в нижней части устройствами для учета стекающей с его поверхности воды и выносимой почвы. Ограждение площадки предотвращает попадание на нее воды, стекающей с прилегающей территории. Длинные стороны площадок располагаются строго перпендикулярно горизонталям склонов. В нижней части площадки для перехвата воды, стекающей со склона, располагается водоприемный лоток под некоторым углом к горизонталям.

Объектом исследований являлись дерново-подзолистые почвы, сформированные на легких лессовидных суглинках. На водораздельной равнине расположены незэродированные почвы, на склоне – эродированные, подножья склона – глееватые намытые почвы.

Смыв почвы, жидкий сток, потери с эрозией гумуса и элементов питания определяли в соответствии с принятыми методиками [5; 6]. Смыв почвы (твердый сток) с территории стоковой площадки определяли путем суммирования стока взвешенных и донных наносов. Сток донных наносов, которые оседали в водоприемном лотке и стокоприемнике, учитывали весовым методом, а сток взвешенных наносов – методом фильтрования проб, отбираемых на мутность на выходе из стокоприемника.

Учет стока талых и ливневых вод выполняли с помощью измерительного оборудования, расположенного в специальном павильоне в нижней части склона. Оборудование представляет собой металлические мерные баки, имеющие две сообщающиеся между собой секции, с водосливными треугольными вырезами в передней стенке. Первая секция служит верхним бьефом водослива, установленного в торцевой части бака, вторая – для приема воды, поступающей из водоприемного лотка стоковой площадки. При учете объема жидкого стока использовали самописцы уровня воды типа «Валдай».

Для установления потерь органического вещества (гумуса), азота, фосфора и калия с жидким стоком стоковые воды отбирали в период весеннего снеготаяния и при выпадении всех стокообразующих дождей. Содержание в твердом стоке (наносах) гумуса определяли по ГОСТ 26212-91<sup>1</sup>, общий азот – по ГОСТ 26107-84<sup>2</sup>, подвижные формы фосфора и калия – по ГОСТ 26207-91<sup>3</sup>. Химический анализ стоковых вод выполняли по методике [7].

## Результаты исследования и их обсуждение

Проявление водно-эрозионных процессов на сельскохозяйственных землях наблюдается в почвенно-климатических условиях Беларуси в два периода: во время зимних оттепелей и весеннего снеготаяния и во время выпадения стокообразующих дождей.

Эрозия почвы при весеннем снеготаянии – результат взаимодействия постоянных (длины, крутизны и экспозиции склона) и динамических факторов (мощности снежного покрова и запасов воды в снеге, влажности и глубины промерзания почвы к моменту начала снеготаяния, наличия или отсутствия ледяной корки, продолжительности и интенсивности таяния снега).

Весеннее снеготаяние на почвенном покрове начинается при переходе среднесуточной температуры воздуха через 0 °С и продолжается от нескольких дней до нескольких недель. В этот период почвы находятся под зяблевой вспашкой (зябью), озимыми зерновыми культурами и многолетними травами. По нашим многолетним наблюдениям, объем жидкого стока изменялся на зяблевой вспашке от 0,2 до 28,4 мм, под посевами озимых зерновых культур достигал 19,6, под многолетними травами – 15,7 мм и в среднем составлял 9,9, 11,1 и 6,6 мм соответственно (табл. 1).

Вынос гумуса и элементов питания (азота, фосфора и калия) с жидким стоком был незначительным по всем изучаемым агрофонам. Потери гумуса колебались в зависимости от объема стока от 0,1 до 10,8 кг/га на зяби, от 0,4 до 7,0 – под озимыми зерновыми культурами и от 0,1 до 5,8 кг/га – под многолетними травами. Среднеголетние значения потерь его с жидким стоком по агрофонам были близкими – 2,2–2,5 кг/га. Смыв азота, фосфора и калия в растворенном виде с поверхностным стоком талых вод за годы исследований не превышал 1 кг/га. Однако наблюдались случаи, когда потери калия на зяби достигали 4,3 кг/га.

<sup>1</sup>ГОСТ 26213-91. Почвы. Определение органического вещества в модификации ЦИНАО. Введ. 07.01.93. Минск: Издательство стандартов; 1992.

<sup>2</sup>ГОСТ 26107-84. Почвы. Методы определения общего азота. Введ. 07.01.85. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации; 1985.

<sup>3</sup>ГОСТ 26207-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Введ. 07.01.93. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации; 1992.

Таблица 1

Потери гумуса и элементов питания растений с жидким стоком при водной эрозии почвы во время весеннего снеготаяния

Table 1

Losses of humus and plant nutrients with liquid runoff with water erosion of the soil during spring snowmelt

Агрофон	Количество наблюдений, лет	Жидкий сток, мм	Потери с жидким стоком, кг/га			
			гумус	N <sub>общ</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Зяблевая вспашка	7	<u>0,2–28,4</u> 9,9	<u>0,1–10,8</u> 2,3	<u>0,1–0,4</u> 0,2	<u>0,1–0,4</u> 0,1	<u>0,1–4,3</u> 0,9
Озимые зерновые культуры	6	<u>0,1–19,6</u> 11,1	<u>0,4–7,0</u> 2,3	<u>0,1–0,4</u> 0,2	<u>0,1–0,2</u> 0,1	<u>0,2–0,7</u> 0,3
Многолетние травы	4	<u>0,1–15,7</u> 6,6	<u>0,1–5,8</u> 2,5	<u>0,1–0,3</u> 0,1	<u>0–0,2</u> <0,1	<u>0–1,1</u> 0,5

Зябь является наиболее эрозионноопасной в период снеготаяния. Смыв почвы с полей, незащищенных растительностью, достигал в отдельные годы 36,1 т/га, при среднемноголетнем значении 6,9 т/га. Под озимыми зерновыми культурами он колебался в пределах 1,1–5,2 т/га, а под многолетними травами – не превышал 0,6 т/га (табл. 2).

Таблица 2

Потери гумуса и элементов питания растений с твердым стоком при водной эрозии почвы во время весеннего снеготаяния

Table 2

Loss of humus and plant nutrients with solid runoff with water erosion of the soil during spring snowmelt

Агрофон	Количество наблюдений, лет	Смыв почвы, т/га	Потери с твердым стоком, кг/га			
			гумус	N <sub>общ</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Зяблевая вспашка	7	<u>0,4–36,1</u> 6,9	<u>1,7–433,1</u> 78,1	<u>0,1–28,4</u> 5,2	<u>0,1–11,9</u> 2,2	<u>0,1–6,7</u> 1,2
Озимые зерновые культуры	6	<u>1,1–5,2</u> 2,2	<u>11,6–62,4</u> 26,3	<u>0,7–3,5</u> 1,5	<u>0,2–1,6</u> 0,6	<u>0,1–1,0</u> 0,3
Многолетние травы	4	<u>0,2–0,6</u> 0,2	<u>2,1–8,9</u> 2,8	<u>0,1–0,4</u> 0,1	<u>0,1–0,3</u> 0,1	<u>0,1–0,9</u> 0,4

Потери гумуса и элементов питания со смываемой почвой существенно зависели от агрофона. По зяблевой вспашке с твердым стоком ежегодно смывалось: гумуса от 1,7 до 433,1 кг/га, азота – от 0,1 до 28,2, фосфора – от 0,1 до 11,9, калия – от 0,1 до 6,7 кг/га. Среднемноголетние значения их составили 78,1, 5,2, 2,2 и 1,2 кг/га соответственно. Под озимыми зерновыми культурами, хорошо защищающими почву от эрозии, среднегодовые потери были в 3–4 раза меньше, чем на зяби – гумуса – 26,3, общего азота – 1,5, подвижного фосфора – 0,6 и подвижного калия – 0,3 кг/га. Возделывание многолетних трав на почвах склонов способствовало еще более заметному снижению эрозионных процессов и уменьшению смыва органического вещества и основных элементов питания растений. Под травами среднемноголетние потери гумуса были в 28 раз, азота – в 52, фосфора – в 22 и калия – в 3 раза меньше, чем на почве, незащищенной растительностью (зябь). Абсолютные величины смыва не превышали: гумуса – 8,9, азота – 0,4, фосфора – 0,3 и калия – 0,9 кг/га.

Данные стока талых вод в зависимости от агротехнического фона показали, что максимальный сток наблюдается на посевах озимых зерновых культур, максимальный смыв почвы – на зяблевой вспашке.

Суммарные среднемноголетние потери гумуса (с жидким и твердым стоком) при весеннем снеготаянии составили на зяби 80,4 кг/га, под озимыми зерновыми культурами – 28,6, под многолетними травами – 5,3 кг/га. Азота, фосфора и калия смывалось на зяби 5,4, 2,3 и 2,1 кг/га соответственно. Озимые зерновые культуры и особенно многолетние травы благодаря корневой системе и надземной массе более надежно предохраняли почву от смыва и выноса элементов питания. На полях, занятых озимыми зерновыми культурами, потери элементов питания сократились примерно в 3,5 раза, а на полях с многолетними травами – в 11 раз и более, за исключением калия, потери которого уменьшились лишь в 2 раза и составили 0,9 кг/га.

Анализ структуры потери гумуса и элементов питания растений с жидким и твердым стоком при снеготаянии показал, что на зяби и под озимыми зерновыми культурами основная масса гумуса (92–97 %), общего азота (88–96 %) и подвижного фосфора (86–96 %) теряется с твердым стоком. Подвижный калий выносится с почвой на 50–57 %. Под многолетними травами структура потерь несколько иная. Так как смыв почвы под ними незначительный (в среднем 0,2 т/га в год), то вынос с ней гумуса составляет 53 %, азота и фосфора – по 50 %. Калий смывается больше с жидким стоком в растворенной форме (56 %).

Интенсивность эрозионных процессов в период стокообразующих дождей зависит от частоты, продолжительности и интенсивности осадков. В летний период эрозионные процессы наиболее интенсивно протекают под пропашными культурами, где смыв почвы достигает 9,6 т/га при среднегодовой величине 7,5 т/га. Яровые зерновые характеризуются более высокой почвозащитной способностью, чем пропашные. Величина потерь почвы под ними колеблется от 0,8 до 6,8 т/га (в среднем 3,2 т/га). На посевах озимых зерновых культур, озимого рапса смыв почвы, как правило, не превышает 0,6 т/га, а под многолетними травами он практически отсутствует.

По нашим наблюдениям, объем жидкого стока за период выпадения дождей по всем изучаемым агрофонам был ниже, чем во время весеннего снеготаяния, и колебался от 0,2 до 10,6 мм. Максимальная его величина отмечалась под пропашными культурами (7,1 мм), минимальная – под многолетними травами (1,5 мм). Яровые и озимые зерновые культуры занимают промежуточное положение (табл. 3).

Таблица 3

**Потери гумуса и элементов питания растений с жидким стоком при водной эрозии почвы в период выпадения стокообразующих дождей**

Table 3

**Losses of humus and plant nutrients with liquid runoff during soil water erosion in period runoff-forming rains**

Сельскохозяйственные культуры	Количество наблюдений, лет	Жидкий сток, мм	Потери с жидким стоком, кг/га			
			гумус	N <sub>общ</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Пропашные	2	<u>6,8–7,4</u> 6,8	<u>1,7–3,0</u> 2,4	<u>0,1–0,3</u> 0,2	<u>0,1–0,2</u> 0,1	<u>1,0–1,7</u> 1,4
Яровые зерновые	7	<u>0,2–10,6</u> 4,5	<u>0,1–1,6</u> 1,0	<u>0,1–0,3</u> 0,1	<u>0,1–0,2</u> 0,1	<u>0,1–0,7</u> 0,4
Озимые зерновые	6	<u>0,3–4,3</u> 3,1	<u>0,2–4,8</u> 1,8	<u>0,1–0,2</u> 0,1	<u>0,1–0,2</u> 0,1	<u>0,1–0,9</u> 0,6
Многолетние травы	4	<u>0,7–3,8</u> 1,5	<u>0,1–1,4</u> 0,5	<u>0,1–0,2</u> 0,1	<u>0,1–0,2</u> 0,1	<u>0,1–0,2</u> 0,1

Что касается выноса элементов питания, то с жидким стоком больше всего терялось гумуса и калия. В зависимости от возделываемых культур величина потерь гумуса изменялась от 0,5 кг/га под многолетними травами до 2,4 кг/га под пропашными культурами. Среди зерновых культур больше гумуса смывалось под озимыми зерновыми (1,8 кг/га), чем под яровыми зерновыми (1,0 кг/га) культурами. В отношении калия такая же закономерность: наибольшие потери под пропашными культурами, затем под озимыми зерновыми, яровыми зерновыми и наименьшие – под многолетними травами. Потери общего азота и подвижного фосфора под всеми возделываемыми культурами были практически одинаковыми.

Вынос гумуса и макроэлементов с твердым стоком был выше, чем с жидким, особенно под пропашными культурами. Здесь среднегодовые потери гумуса составили 157,2 кг/га, азота – 7,6, фосфора – 3,5 и калия – 1,9 кг/га. Под яровыми культурами в среднем терялось 25,4 кг/га гумуса, хотя в отдельные годы его смывалось до 63,9 кг/га. Общего азота терялось от 0,5 до 4,6 кг/га, фосфора – от 0,3 до 1,9 и калия – от 0,1 до 1,2 кг/га. Потери элементов питания под посевами озимых зерновых культур были незначительными: гумуса – 0,2–11,6 кг/га, азота – 0,1–0,4, фосфора – 0,1–0,2 и калия – до 0,1 кг/га. Под многолетними травами смыв практически отсутствовал.

Таким образом, под пропашными и яровыми зерновыми культурами с твердым стоком теряется 96–98 % гумуса, 96–97 % общего азота и 92–97 % подвижного фосфора от общего количества питательных веществ, выносимых с процессами эрозии в период выпадения стокообразующих дождей. Обменного калия смывалось под пропашными культурами – 58 %, под яровыми зерновыми культурами – 50 %. Под озимыми зерновыми культурами со смывом почвы доля выноса гумуса составляет 68 %, азота и фосфора – по 50, калия – только 14 %, что в 6 раз меньше, чем с жидким стоком. Под многолетними травами: гумуса – 38 % и макроэлементов – по 50 % (табл. 4).

Потери гумуса и элементов питания растений с твердым стоком  
при водной эрозии почвы в период выпадения стокообразующих дождей

Table 4

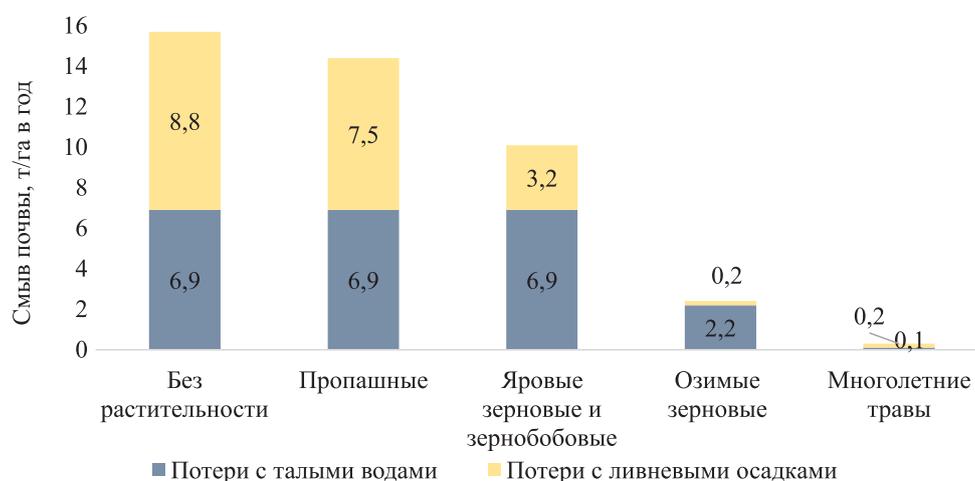
Losses of humus and plant nutrients with solid runoff during soil water erosion in period runoff-forming rains

Сельскохозяйственные культуры	Количество наблюдений, лет	Смыв почвы, т/га	Потери с жидким стоком, кг/га			
			гумус	N <sub>общ</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Пропашные	2	$\frac{5,5-9,6}{7,5}$	$\frac{51,0-263,4}{157,2}$	$\frac{3,7-11,5}{7,6}$	$\frac{1,1-5,8}{3,5}$	$\frac{0,6-3,1}{1,9}$
Яровые зерновые	7	$\frac{0,8-6,8}{3,2}$	$\frac{7,9-63,9}{25,4}$	$\frac{0,5-4,0}{2,2}$	$\frac{0,3-1,7}{1,2}$	$\frac{0,1-1,2}{0,4}$
Озимые зерновые	6	$\frac{0,1-0,6}{0,2}$	$\frac{0,2-11,6}{3,8}$	$\frac{0,1-0,4}{0,2}$	$\frac{0,1-0,2}{0,1}$	$\frac{0,1-0,2}{0,1}$
Многолетние травы	4	$\frac{0-0,1}{0,03}$	$\frac{0-1,1}{0,3}$	$\frac{0-0,1}{0,1}$	$\frac{0-0,1}{0,1}$	$\frac{0-0,1}{0,1}$

Суммарный смыв гумуса (твердый + жидкий сток) за весь период выпадения стокообразующих дождей под пропашными культурами составил 159,6 кг/га. При возделывании яровых зерновых культур потери его были меньше в 6 раз – 26,4 кг/га. Под озимыми зерновыми культурами и многолетними травами вынос гумуса с ливневыми осадками был незначительным – 5,6 и 0,8 кг/га соответственно.

Суммарные потери элементов питания при выпадении стокообразующих дождей были выше, чем при снеготаянии. На пропашных культурах азота теряется в среднем 7,8 кг/га, фосфора – 3,6 и калия – 3,3 кг/га. При возделывании яровых зерновых потери макроэлементов – в 3–4 раза меньше, а под озимыми зерновыми культурами и многолетними травами они не превышали 1 кг/га.

Многолетние данные показали, что суммарный смыв дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы с незащищенной растительностью поверхности составляет около 16 т/га в год, из них 44 % потерь приходится на талый сток и 56 % – на ливневый. Возделывание пропашных культур незначительно снижает интенсивность эрозионных процессов. Под ними ежегодно в среднем теряется около 14,5 т/га почвы. Под культурами сплошного сева (яровыми и, особенно, озимыми зерновыми) потери почвы уменьшаются более существенно. При возделывании яровых зерновых и зернобобовых культур твердый сток составляет в среднем 10,1 т/га в год, что на 36 % ниже, чем с незащищенной растительностью почвы и на 30 % – чем под пропашными культурами. Следует отметить, что снижение интенсивности эрозии под яровыми зерновыми и зернобобовыми культурами происходит за счет сокращения смыва в период стокообразующих дождей, на который приходится всего около 32 % потерь (см. рисунок).



Суммарный смыв почвы под разными группами сельскохозяйственных культур

Total soil loss under different groups of crops

Ежегодный смыв почвы при возделывании озимых зерновых культур незначительно превышает предельно допустимый (2,0 т/га в год) и составляет 2,4 т/га. Потери почвы (96 %) происходят, в основном, во время снеготаяния. Под многолетними травами твердый сток фактически отсутствует – 0,3 т/га в год.

Оценивая в целом потери гумуса, азота, фосфора и калия с жидким и твердым стоком, можно сделать вывод, что они существенно зависят от использования склоновых земель. При возделывании пропашных, яровых зерновых и зернобобовых культур (с учетом зяби) ежегодно теряется гумуса 240,0 и 106,8 кг/га, общего азота – 13,2 и 7,7, подвижного фосфора – 5,9 и 3,6, обменного калия – 5,4 и 2,9 кг/га соответственно. Поскольку озимые зерновые культуры большую часть года защищают почву от эрозии, а многолетние травы – круглый год, то и смыв элементов питания растений под ними гораздо ниже. Суммарные потери при возделывании озимых зерновых культур ниже в 2–4 раза по сравнению с яровыми зерновыми и зернобобовыми культурами и составляют: гумуса – 34,2 кг/га, азота – 1,9, фосфора – 0,9 и калия – 1,3 кг/га в год. Под многолетними травами потери макроэлементов в пределах 1 кг/га, гумуса – 6,1 кг/га (табл. 5).

Таблица 5

Суммарные потери гумуса и макроэлементов с водной эрозией, кг/га в год

Table 5

Total loss of humus and macronutrients due to water erosion, kg/ha per year

Сельскохозяйственные культуры	Суммарные потери				В том числе							
					с жидким стоком				с твердым стоком			
	гумус	N <sub>общ</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	гумус	N <sub>общ</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	гумус	N <sub>общ</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Пропашные	240,0	13,2	5,9	5,4	4,7	0,4	0,2	2,3	235,3	12,8	5,7	3,1
Яровые зерновые	106,8	7,7	3,6	2,9	3,3	0,3	0,2	1,3	103,5	7,4	3,4	1,6
Озимые зерновые	34,2	1,9	0,9	1,3	4,1	0,3	0,2	0,9	30,1	1,6	0,7	0,4
Многолетние травы	6,1	0,3	0,3	1,1	3,0	0,2	0,1	0,6	3,1	0,1	0,2	0,5

Анализируя суммарный вынос гумуса и макроэлементов с жидким и твердым стоком, установили, что из общего количества выносимых с водной эрозией гумуса, общего азота и подвижного фосфора преобладающая доля их выносятся с твердым стоком. Причем прослеживается четкая зависимость в уменьшении потерь всех элементов питания от возделываемой культуры: наибольшие количественные показатели – под пропашными культурами, наименьшие – под многолетними травами. Вынос питательных веществ с жидким стоком имеет низкие значения: гумус – 3–4,7 кг/га, азот – 0,2–0,4 и фосфор – 0,1–0,2 кг/га. Подвижный калий с мелкоземом в большей степени теряется на пропашных и яровых зерновых культурах (где больший смыв почвы), а под озимыми зерновыми культурами и многолетними травами он преимущественно выносятся с жидким стоком.

На основе результатов многолетнего мониторинга за развитием водно-эрозионных процессов на стационарных стоковых площадках и в полевых условиях на дерново-подзолистых почвах установлены параметры потенциального смыва почвы в зависимости от степени подверженности почв водной эрозии. На почвах слабо подверженных эрозии на склонах 1–3° потенциальный смыв составляет до 5 т/га в год, а на почвах очень сильно подверженных эрозии на склонах > 7° – превышает 20 т/га в год (табл. 6).

Таблица 6

Градации почв разной степени эродированности по потенциальному смыву

Table 6

Gradations of soils with different degrees of erosion according to potential washout

Степень подверженности почвы эрозии	Крутизна склона, в градусах	Потенциальный смыв почвы, т/га в год
Слабая	1–3°	До 5,0
Средняя	3–5°	5,1–10,0
Сильная	5–7°	10,1–20,0
Очень сильная	Более 7°	Более 20,0

С использованием экспериментальных данных рассчитаны потенциально возможные потери почвы под различными группами сельскохозяйственных культур в зависимости от степени подверженности почв водной эрозии (табл. 7).

Таблица 7

Потенциальные потери почвы под разными группами сельскохозяйственных культур

Table 7

Potential soil losses under different groups of crops

Сельскохозяйственные культуры	Степень подверженности почвы водной эрозии	Смыв почвы, т/га в год
Пропашные (картофель, свекла сахарная, столовая и кормовая, кукуруза, овощные)	Слабая	4,5
	Средняя	9,0
	Сильная	18,0
Яровые зерновые и зернобобовые (пшеница, ячмень, тритикале, овес, горох, пелюшка, люпин), яровой рапс	Слабая	3,2
	Средняя	6,5
	Сильная	13,0
Озимые зерновые (рожь, пшеница, тритикале), озимый рапс	Слабая	0,8
	Средняя	1,6
	Сильная	3,2
Однолетние травы (горох-, пелюшко-, вико-овсяные смеси)	Слабая	3,3
	Средняя	6,6
	Сильная	13,2
Многолетние бобовые (клевер, люцерна, галега), бобово-злаковые и злаковые травы	Слабая	0,1
	Средняя	0,2
	Сильная	0,4

Под пропашными культурами широкорядного посева (картофель, свекла сахарная, столовая и кормовая, кукуруза, овощные культуры) потенциальный годовой смыв почвы колеблется от 4,5 т/га на почвах слабо подверженных водной эрозии до 18,0 т/га – на почвах сильно подверженных водной эрозии. Под яровыми зерновыми и зернобобовыми культурами (пшеница, ячмень, тритикале, овес, горох, пелюшка, люпин) и яровым рапсом потенциальный смыв почвы изменяется от 3,2 до 13 т/га в год, под озимыми зерновыми (рожь, пшеница, тритикале) и озимым рапсом – от 0,8 до 3,3 т/га в год. При возделывании многолетних бобовых (клевер, люцерна, галега), бобово-злаковых и злаковых трав смыв почвы практически отсутствует.

С учетом потенциально возможной величины водной эрозии почв и среднего содержания органического вещества (гумуса) и элементов минерального питания (азота, фосфора, калия) в пахотном 20-сантиметровом слое слабо-, средне- и сильноэродированных почв определены количественные параметры потерь их на почвах в разной степени подверженных водно-эрозионным процессам под различными группами сельскохозяйственных культур (табл. 8).

При возделывании пропашных культур потери гумуса с водной эрозией могут составлять от 100 кг/га в год на слабоэродированных почвах до 240 кг/га в год – на сильноэродированных почвах. Под яровыми зерновыми и зернобобовыми культурами потери колеблются от 80 до 170 кг/га в год, под озимыми зерновыми – от 25 до 45, а под многолетними травами – от 5 до 10 кг/га в год.

Количественные параметры потерь азота с водной эрозией колеблются на пропашных культурах от 12,5 до 46,0 кг/га, на яровых зерновых, зернобобовых культурах и однолетних травах – от 5,0 до 17,0, на озимых зерновых культурах – от 1,5 до 5,0 кг/га в год. Значения потерь подвижных соединений фосфора и калия составляют соответственно 4,5–10,5 и 7,5–20,0 кг/га в год на пропашных культурах, 3,5–8,0 и 5,5–15,0 – на яровых зерновых и зернобобовых культурах, 1,5–3,0 и 3,5–7,0 кг/га – на озимых зерновых культурах. Потери элементов минерального питания под многолетними травами не превышают 1,0–1,5 кг/га в год.

Количественные параметры потерь гумуса, азота, фосфора и калия с водной эрозией почв приняты в качестве нормативов при расчетах баланса (прихода и расхода) органического вещества и элементов питания в почвах пахотных и луговых земель, а также для оценки экологического и экономического ущерба, причиняемого эрозией почв.

**Нормативные потери гумуса и элементов питания на почвах разной степени эродированности под различными группами сельскохозяйственных культур**

Table 8

**Losses of humus and nutrients under different groups crops**

Сельскохозяйственные культуры	Эродированность почвы	Потери, кг/га в год			
		гумус	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Пропашные (картофель, свекла сахарная, столовая и кормовая, кукуруза, овощные)	Слабая	100	12,5	4,5	7,5
	Средняя	170	23,0	7,5	15,0
	Сильная	240	46,0	10,5	20,0
Яровые зерновые и зернобобовые (пшеница, ячмень, тритикале, овес, горох, пелюшка, люпин), яровой рапс	Слабая	80	5,0	3,5	5,5
	Средняя	125	8,5	5,5	10,0
	Сильная	170	17,0	8,0	15,0
Озимые зерновые (рожь, пшеница, тритикале), озимый рапс	Слабая	25	1,5	1,5	3,5
	Средняя	35	4,0	2,0	5,0
	Сильная	45	5,0	3,0	7,0
Однолетние травы (горох-, пелюшко-, вико-овсяные смеси)	Слабая	85	5,0	3,5	5,5
	Средняя	130	8,5	5,5	10,0
	Сильная	175	17,0	8,0	15,0
Многолетние бобовые (клевер, люцерна, галега), бобово-злаковые и злаковые травы	Слабая	5,0	0,6	0,2	0,3
	Средняя	8,0	1,0	0,3	0,4
	Сильная	10,0	1,5	0,5	0,6

**Заключение**

Многолетние данные стока талых вод показали, что максимальный сток наблюдался на посевах озимых зерновых, максимальный смыв почвы – по зяблевой вспашке. Гумус, азот, фосфор и калий теряются в основном с твердым стоком. Суммарные потери при водной эрозии почв в период весеннего снеготаяния гумуса, азота, фосфора и калия составляют на зяблевой вспашке 80,4, 5,4, 2,3 и 2,1 кг/га в год соответственно, на озимых зерновых культурах – 28,6, 1,7, 0,7 и 0,6 кг/га в год, под многолетними травами – 5,3, 0,2, 0,2 и 0,9 кг/га в год.

Многолетние данные стока дождевых вод в зависимости от возделываемых культур показали, что максимальный сток и смыв наблюдался под пропашными культурами, минимальный – под многолетними травами. Основные потери гумуса, азота и фосфора под пропашными и яровыми зерновыми культурами отмечаются с твердым стоком. Под многолетними травами гумус больше смывается с жидким, а азот и фосфор – в равных количествах с жидким и твердым стоком. Калий больше выносится с почвой на пропашных культурах, на озимых зерновых культурах – с жидким стоком. На яровых зерновых культурах и многолетних травах его потери с жидким и твердым стоком одинаковые.

В целом при возделывании пропашных культур потери гумуса с водной эрозией могут составлять 240 кг/га в год, под яровыми зерновыми и зернобобовыми культурами – 8–170, под озимыми зерновыми – 25–45 кг/га в год, а под многолетними травами не более 10 кг/га. Общие потери азота с водной эрозией колеблются от 12,5–46,0 кг/га под пропашными культурами до 1,5–5,0 кг/га под озимыми зерновыми культурами. Потери подвижных форм фосфора и калия составляют 4,5–20,0 кг/га в год на пропашных культурах, 3,5–15,0 – на яровых зерновых и зернобобовых культурах, 1,5–7,0 – на озимых зерновых культурах и менее 2 кг/га в год на многолетних травах.

Количественные параметры потерь гумуса, азота, фосфора и калия с водной эрозией почв приняты в качестве нормативов при расчетах баланса (прихода и расхода) органического вещества и элементов питания в почвах пахотных и луговых земель, оценке экологического и экономического ущерба, причиняемого эрозией почв.

## Библиографические ссылки

1. Лапа ВВ и др. *Почвы Республики Беларусь*. Минск: ИВЦ Минфина; 2019. 632 с.
2. Литвин ЛФ. *География эрозии почв сельскохозяйственных земель России*. Москва: Академкнига; 2002. 255 с.
3. *Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирование систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. В: Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий. Том 1. Коллективная монография*. Москва: Почв. Институт им. В. В. Докучаева Россельхозакадемии; 2013. 756 с.
4. Черныш АФ и др. Деградация почв сельскохозяйственных земель Беларуси: виды и количественная оценка. *Почвоведение и агрохимия*. 2016;2(57):7–18.
5. *Методические рекомендации по учету поверхностного стока и смыва почвы при изучении водной эрозии*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1975. 88 с.
6. *Принципы организации и методы стационарного изучения почв*. Москва: Наука; 1976. 415 с.
7. *Руководство по химическому анализу вод суши*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1973. 270 с.

## References

1. Lapa VV, et al. *Pochvy Respubliki Belarus* [Soils of the Republic of Belarus]. Minsk: Information Center of the Ministry of Finance; 2019. 632 p. Russian.
2. Litvin LF. *Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaystvennykh zemel Rossii* [Geography of soil erosion of agricultural lands in Russia]. Moscow: Akademkniga; 2002. 255 p. Russian.
3. *Nauchnyye osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaystvennykh ugodiy Rossii i formirovaniye sistem vosproizvodstva ikh plodorodiya v adaptivno-landshaftnom zemledelii. V: Teoreticheskiye i metodicheskiye osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaystvennykh ugodiy. Tom 1. Kollektivnaya monografiya*. [Scientific foundations for preventing degradation of soils (lands) of agricultural lands in Russia and the formation of systems for the reproduction of their fertility in adaptive landscape agriculture. In: Theoretical and methodological foundations for preventing degradation of soils (lands) of agricultural lands. Volume 1. Collective monograph]. Moscow: Soil. Institute named V. V. Dokuchaev of the Russian Agricultural Academy; 2013. 756 p. Russian.
4. Chernysh AF, et al. Soil degradation of agricultural lands in Belarus: types and quantitative assessment. *Pochvovedeniye i agrokhimiya* [Soil science and agrochemistry]. 2016;2(57):7–18. Russian.
5. *Metodicheskiye rekomendatsii po uchetu poverkhnostnogo stoka i smyva pochvy pri izuchenii vodnoy erozii* [Guidelines for accounting for surface runoff and soil runoff in the study of water erosion]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1975. 88 p. Russian.
6. *Printsipy organizatsii i metody statsionarnogo izucheniya pochv* [Principles of organization and methods of stationary study of soils]. Moscow: Science; 1976. 415 p. Russian.
7. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu vod sushi* [Guidance on the chemical analysis of land waters]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1973. 270 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 11.02.2022.  
Received by editorial board 11.02.2022.

УДК 544:544.7:504.06:504.062:04.4.054

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЛОКУЛЯНТА «АММИАЧНЫЙ» НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ СТОЧНЫХ ВОД

Е. Ю. ШАЧНЕВА<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет,  
ул. Просвещения, 132, 346428, г. Новочеркасск, Россия

Представлены результаты исследований применения полиакриламидного флокулянта «Аммиачный» для флокуляционной очистки модельных растворов сточных вод. Показана роль физико-химического метода очистки промышленных сточных вод с применением высокомолекулярных флокулянтов. Приведены значения эффективности описываемого метода исследования. Дана краткая характеристика флокулянтов, рассмотрены особенности применения компонентов для таких отраслей промышленности, как химическая и нефтехимическая. Кратко охарактеризован класс полиакриламидных флокулянтов типа АК-631, используемый в качестве объекта исследования. В ходе работы приведены примеры различных типов модельных систем (активированный уголь, углекислый кальций, каолин, кварцевый песок). Описаны параметры, характеризующие процесс флокуляции. Приведены основные уравнения расчета характеристик процесса, определены размеры частиц дисперсной фазы, рассчитана оптимальная концентрация полиэлектролита. Рассмотрены графические зависимости, подтверждающие экспериментальные значения величин. Исследовано влияние природы и концентрации (поли)электролита на скорость флокуляции суспензий активированного угля БАУ и кварцевого песка. Рассчитаны величины мутности, цветности и активности рассматриваемого полиэлектролита. Приведены графические зависимости величины активности от объема введенного реагента. Определены аналогичные значения для полиакриламидных флокулянтов типа АК-631 (А-930 и А-1510). Показано влияние концентрации введенного в систему вещества на величину активности компонента. Приведенные значения представлены в форме графических зависимостей, проведен сравнительный анализ. Исследованы скорости осветления суспензий в присутствии полиэлектролита. Приведены кинетические кривые осветления рассматриваемых суспензий. Рассчитаны величины начальных скоростей осаждения частиц дисперсных фаз для всех рассматриваемых полиакриламидных флокулянтов. Описано влияние величины начальной скорости осаждения частиц от флокуляционной активности полиакриламидных флокулянтов с ростом их концентрации. Рассмотрен процесс очистки модельной системы от ионов цинка для рассматриваемых компонентов. Представлены графические зависимости величины эффективности от объема введенного вещества. Проведен сравнительный анализ применения компонента с полиакриламидными флокулянтами типа АК-631 (А-930 и А-1510).

**Ключевые слова:** флокуляция; цветность; мутность; активность; скорость осветления; очистка; эффективность очистки.

## STUDY OF THE PROCESS OF WATER PURIFICATION USING FLOCCULANT «AMMONIA» ON THE EXAMPLE OF MODEL WASTEWATER SYSTEMS

E. Yu. SHACHNEVA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>South-Russian State Polytechnic University  
132 Prosveshcheniya Street, Novocherkassk 346428, Russia

---

### Образец цитирования:

Шачнева ЕЮ. Исследование процесса очистки воды с применением флокулянта «Аммиачный» на примере модельных систем сточных вод. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;1:94–103.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-94-103>

### For citation:

Shachneva EYu. Study of the process of water purification using flocculant «Ammonia» on the example of model wastewater systems. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;1:94–103. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-94-103>

---

### Автор:

Евгения Юрьевна Шачнева – кандидат химических наук, доцент; профессор.

### Author:

Evgeniya Yu. Shachneva, PhD (chemistry), docent; professor.  
[evgshachneva@yandex.ru](mailto:evgshachneva@yandex.ru)

The presented material shows the results of studies on the use of polyacrylamide flocculant «Ammonia» for flocculation treatment of model wastewater solutions. The role of the physico-chemical method of industrial wastewater treatment with the use of high-molecular flocculants is shown. The values of the effectiveness of the described research method are given. A brief description of flocculants is presented, the features of the use of components for various industries, such as chemical and petrochemical, are considered. The class of polyacrylamide flocculants of the AK-631 type used as an object of research is briefly characterized. In the course of the work, examples of various types of model systems (activated carbon, calcium carbonate, kaolin, quartz sand) are given. The parameters characterizing the flocculation process are described. The basic equations for calculating the characteristics of the process are given. In the course of the work, the particle sizes of the dispersed phase were determined, and the optimal concentration of polyelectrolyte was calculated. Graphical dependences confirming the experimental values of the quantities are considered. The influence of the nature and concentration of (poly)electrolyte on the flocculation rate of activated carbon suspensions of BAU and quartz sand is investigated. The values of turbidity, chromaticity and activity of the polyelectrolyte under consideration are calculated. Graphical dependences of the activity value on the volume of the injected reagent are given. Similar values were determined for polyacrylamide flocculants of the AK-631 type (A-930 and A-1510). The effect of the concentration of the substance introduced into the system on the activity of the component is described. The given values are presented in the form of graphical dependencies, a comparative analysis is carried out. The rates of clarification of suspensions in the presence of polyelectrolyte are investigated. Kinetic clarification curves of the suspensions under consideration are given. The values of the initial deposition rates of particles of dispersed phases for all considered polyacrylamide flocculants are calculated. The effect of the initial particle deposition rate on the flocculation activity of polyacrylamide flocculants with an increase in their concentration is described. The process of purification of the model system from zinc ions for the components under consideration is considered. Graphical dependences of the efficiency value on the volume of the injected substance are presented. A comparative analysis of the use of the component with polyacrylamide flocculants of the AK-631 type (A-930 and A-1510) was carried out.

**Keywords:** flocculation; color; turbidity; activity; clarification rate; purification; purification efficiency.

## Введение

Современный уровень развития промышленного производства неотъемлемо влияет на состояние окружающей среды, особенно водных объектов, в связи с чем проблема защиты водных систем от загрязнений становится все более актуальной. Выбор того или иного метода очистки зависит от сферы деятельности предприятия, объема его производства и типа сырья, финансовых возможностей, санитарных требований. Весьма широко распространен и достаточно эффективен физико-химический метод очистки промышленных сточных вод с применением высокомолекулярных флокулянтов. Говоря о возможностях метода, необходимо отметить, что его эффективность находится в пределах 98 %, что дает возможность очищать сточные воды предприятий от поверхностно-активных веществ, нефтепродуктов, тяжелых металлов и ряда других токсикантов [1–6]. Рассматривая значительное многообразие представленных на рынке веществ, обсуждение вопроса поиска наиболее приемлемых как с технологических, так и экономических позиций реагентов весьма актуально.

Флокулянты – это синтетические водорастворимые органические и природные полимеры, применяемые в различных сферах производства, в том числе в химической промышленности и нефтехимическом производстве. Данная группа веществ незаменима в качестве диспергаторов при измельчении твердых тел, бурении твердых пород (понижители твердости), для улучшения смазочного действия, понижения трения и износа, интенсивности нефтеотдачи пластов и т. д. Их применение определяется поверхностной активностью вещества, структурой адсорбционных слоев и объемными свойствами растворов.

В российской промышленности широко используется полиакриламид (ПАА), а также такие полимеры на его основе, как компоненты класса АК-631. Кроме вышеперечисленных веществ, широко применялись вещества производства компаний Германии, США, Франции, Великобритании, Японии, Финляндии и др. Полиакриламид представляет собой высокомолекулярное органическое соединение с молекулярной массой порядка  $0,5 \cdot 10^6$ – $6 \cdot 10^6$ . В исследованиях выбор того или иного флокулянта основан на определенном наборе таких факторов, как заряд скоагулированных частиц, кислотность очищаемой среды, наличие примесей и т. д. Процесс флокулирования дает возможность сократить затраты на производство, минимизировать вторичное загрязнение воды. Кроме того, необходимо отметить способность химического взаимодействия с растворенными примесями сточных вод с образованием нерастворимых соединений. Интересно для рассмотрения взаимодействие флокулянтов с широко встречающимися загрязнителями, например, такими тяжелыми металлами, как цинк и железо, являющимися при этом биогенными элементами. Это способствует упрощению технологии очистки с применением флокулянтов, расширению ее

предметной области, усилению эффективности применения. Все вышесказанное позволит решить проблему обезвреживания сильнозагрязненных сточных вод, в частности металлами [7–9].

Основной целью работы явилось определение величины флокуляционной активности полиакриламидных флокулянтов на примере флокулянта «Аммиачный» для модельных суспензий активированного угля БАУ и кварцевого песка, а также рассмотрение связи значений флокуляционной активности с объемом введенного реагента и проведение анализа полученных результатов в сравнении с флокулянтами типа АК-631 (А-930 и А-1510).

### Материалы и методы исследования

Рассмотрение процесса флокуляции предварительно производят на модельных системах. Достаточно широко применимы суспензия активированного угля ( $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$ ), углекислого кальция ( $\rho = 2,4 \text{ г/см}^3$ ), каолина ( $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$ ), кварцевого песка ( $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$ ) и т. д. Объектом данного исследования определены были суспензии активированного угля и кварцевого песка ввиду их наибольшей применимости и низкой себестоимости компонентов. Определение устойчивости и флокуляционной активности суспензий производится посредством методов, контролируемых макроскопические параметры систем: скорость седиментации (осаждения), оптическая плотность, изменение концентрации суспензии по высоте и во времени. Это дает возможность детально рассмотреть флокуляционный процесс очистки модельных растворов сточных вод от ионов металла с применением полиакриламидного флокулянта, а также сравнить эффективность процесса очистки с применением различных компонентов [10–14].

В исследовании применялись модельные растворы, приготовленные на дистиллированной воде с использованием химически чистых реактивов флокулянта типа «Аммиачный», А-631 (А-930, А-1510); активированный уголь марки БАУ; кварцевый песок; металлический цинк; соляная кислота (НС1) (конц.); раствор буры; 0,05%-ный раствор сульфурсазена (в 0,05 М растворе буры); 20%-ный раствор натрия сернокислого (свежеприготовленный); 10%-ный раствор сульфосалициловой кислоты; стандартный раствор соли цинка ( $1 \text{ г/дм}^3$ ); раствор известкового молока; фотоколориметр ПЭ-5400в; лабораторное оборудование.

Для приготовления стандартного раствора  $0,5 \text{ г}$  металлического цинка растворяют в  $20 \text{ см}^3$  соляной кислоты и переносят в мерную колбу на  $500 \text{ см}^3$ . Рабочий раствор готовят разбавлением стандартного раствора:  $1 \text{ см}^3$  стандартного раствора переносят в мерную колбу на  $100 \text{ см}^3$  и доводят дистиллированной водой до метки. в процессе изучения использовали  $1,0 \%$  растворы флокулянта [10].

### Результаты исследования и их обсуждение

При определении флокуляционной активности полиакриламидного флокулянта «Аммиачный» определяющими факторами служат условия введения реагента, природа и количество добавленного полимера, его молекулярная масса и заряд, содержание в системе дисперсной фазы и электролитов. Необходимо отметить, что происходящие процессы флокуляции и стабилизации дисперсий высокомолекулярными веществами всегда взаимосвязаны. Оценивая параметры флокуляции применяют относительный безразмерный параметр  $D$ , величина которого зависит от:

– скорости седиментации суспензии в присутствии  $V_s$  и в отсутствии добавок флокулянтов  $V_s^0$ :

$$D = \frac{V_s}{V_s^0}, \quad (1)$$

– величин мутности надосадочной жидкости в присутствии  $\tau$  и в отсутствии добавок флокулянтов  $\tau^0$ :

$$D = \frac{\tau}{\tau^0}. \quad (2)$$

Активность флокулянта  $\lambda$  характеризуется отношением флокулирующего эффекта к концентрации флокулянта:

$$\lambda = \frac{D}{C_\phi}. \quad (3)$$

**Определение размеров частиц дисперсной фазы.** Размеры рассматриваемых частиц в изучаемых системах были определены исходя из способа Геллера. В его основе лежит следующее выражение [7; 8]:

$$A = \kappa \cdot \lambda^{-n}, \quad (4)$$

где  $\kappa$  – константа, не зависящая от длины волны,  $A$  – оптическая плотность раствора,  $\lambda$  – длина волны падающего света.

На основании полученных в ходе эксперимента данных производили построение зависимости  $lg A$  от  $lg \lambda$ , представленной в виде прямой линии, тангенс угла наклона которой равен показателю степени  $n$  с минусом. Полученное значение показателя степени  $n$  влияет на величину соотношения между размером частицы и длиной волны падающего света, характеризуемого параметром определяемого согласно следующему выражению:

$$Z = 8\pi \cdot r / \lambda, \quad (5)$$

где  $r$  – радиус частиц,  $\lambda$  – среднее значение длины волны падающего излучения.

Исходя из полученных опытным путем данных величины  $n$ , рассчитывают значение  $Z$  по табл. 1 и средний радиус частиц исследуемой дисперсной системы.

Таблица 1

Показатель степени  $n$  в уравнении Геллера в зависимости от параметра  $Z$

Table 1

Index of power  $n$  in Geller's equation in dependence on the  $Z$  parameter

$n$	3,812	3,686	3,575	3,436	3,284	3,121	3,06	2,807	2,657
$Z$	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
$n$	2,533	2,457	2,379	2,329	2,075	1,974	1,635	1,584	–
$Z$	6,5	7,0	7,5	8,0	8,01	8,5	9,0	9,5	–

Опираясь на вышеизложенную методику, были получены графические зависимости  $lg A - lg \lambda$ , представленные на рис. 1.

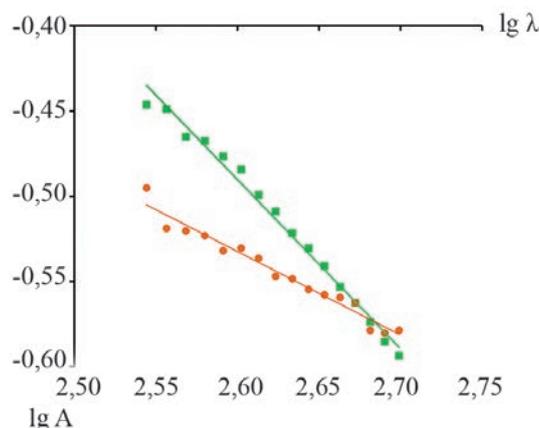


Рис. 1. Графическая зависимость  $lg A - lg \lambda$ : ● – для частиц активированного угля БАУ, ■ – для частиц кварцевого песка

Fig. 1. Graphic dependence  $lg A - lg \lambda$ : ● – for BAU activated carbon particles, ■ – for high-silica sand particles

Размеры рассмотренных в ходе исследования частиц дисперсной фазы (активированного угля и кварцевого песка) равны 54,65 и 96,45 нм соответственно.

**Изучение оптимальной концентрации полиэлектролита.** Для определения оптимальной величины концентрации вводимого флокулянта необходимо было рассмотреть влияние природы и концентрации (поли)электролита на скорость флокуляции исследуемых суспензий. Применялись модельные дисперсные смеси (системы): 0,01%-ная суспензия активированного угля ( $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$ ) и 0,8%-ная суспензия кварцевого песка ( $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$ ) [10; 11]. Для этого проводили приготовление модельных систем, вносили необходимое количество раствора флокулянта, перемешивали в течение 1–1,5 мин с целью равномерного распределения полиэлектролита по всему объему суспензии. Затем систему отстаивали примерно 30 мин и проводили определение оптической плотности надосадочной жидкости относительно дистиллированной воды. На основании полученных в ходе экспериментальных данных производили построение графических зависимостей величин оптических плотностей растворов от концентраций введенных полиэлектролитов для определения оптимальной дозы реагента (рис. 2, 3).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что оптимальными величинами концентрации являются значения 0,1, 0,5 и 1,0 % соответственно. Рассматриваемые величины концентраций будут рассматриваться нами в ходе дальнейших исследований.

**Изучение влияния природы и концентрации (поли)электролита на скорость флокуляции суспензии активированного угля БАУ и кварцевого песка.** С целью исследования влияния природы и концентрации компонента на флокуляционные процессы были определены величины мутности ( $\tau$ ):

$$\tau = \frac{A \cdot 2,3}{l}, \quad (6)$$

где  $A$  – оптическая плотность,  $l$  – длина кюветы, см.

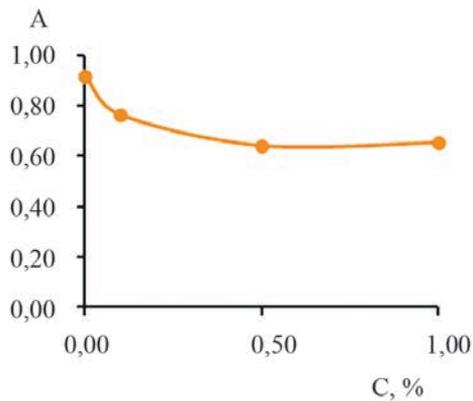


Рис. 2. Зависимость оптической плотности суспензии активированного угля БАУ от концентрации флокулянта «Аммиачный»

Fig. 2. Graphical dependence of the BAC suspension optical density on the concentration of flocculant «Ammonia»

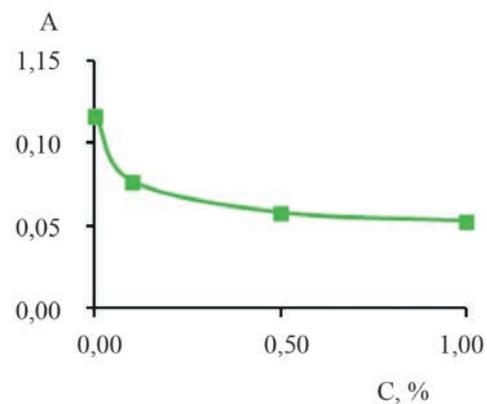


Рис. 3. Зависимость оптической плотности суспензии кварцевого песка от концентрации флокулянта «Аммиачный»

Fig. 3. Graphical dependence of the quartz sand suspension optical density on the concentration of flocculant «Ammonia»

В рамках исследований также проводили определение величины цветности модельных систем на основе ГОСТа 3351-74 (1–70 градусов). Он применяется для оценки содержания взвешенных веществ, которые не были удалены путем отстаивания и фильтрации.

Полученные величины мутности ( $\tau$ ) и цветности позволили определить величины активности флокулянтов  $\lambda$  (рис. 4–6), которые способны послужить в качестве характеристики величины флокулирующего эффекта к объему введенного реагента, а следовательно, и его концентрации в рассматриваемой смеси. В качестве сравнения аналогичные значения были получены и для флокулянтов серии АК-631 (А-930 и А-1510), приведенные на рис. 5, 6.

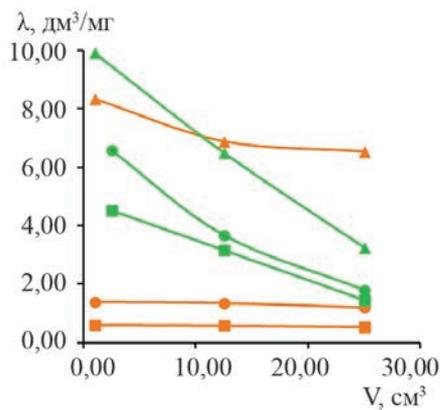


Рис. 4. Графическая зависимость величины активности реагента в растворе в присутствии частиц активированного угля БАУ (оранжевый маркер) и кварцевого песка (зеленый маркер) от объема введенного флокулянта «Аммиачный» (■ – 0,1 %, ● – 0,5 %, ▲ – 1,0 % раствор реагента)

Fig. 4. Graphic dependence of the agent-in-solution activity value in the presence of BAC activated carbon particles (orange marker) and high-silica sand (green marker) on the volume of the introduced «Ammonia» flocculant (■ – 0,1 %, ● – 0,5 %, ▲ – 1,0 % agent solution)

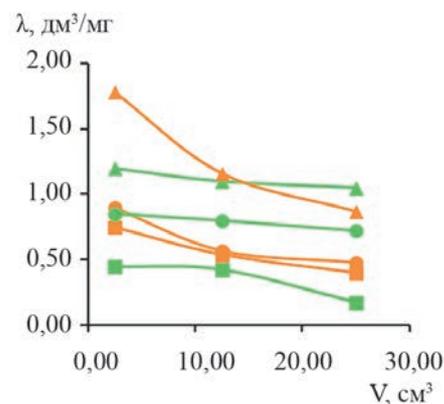


Рис. 5. Графическая зависимость величины активности реагента в растворе в присутствии частиц активированного угля БАУ (оранжевый маркер) и кварцевого песка (зеленый маркер) от объема введенного флокулянта А-930 (■ – 0,1 %, ● – 0,5 %, ▲ – 1,0 % раствор реагента)

Fig. 5. Graphic dependence of the agent-in-solution activity value in the presence of BAC activated carbon particles (orange marker) and high-silica sand (green marker) on the volume of the introduced A-930 flocculant (■ – 0,1 %, ● – 0,5 %, ▲ – 1,0 % agent solution)

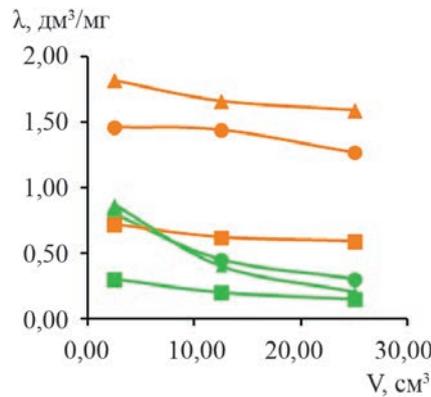


Рис. 6. Графическая зависимость величины активности реагента в растворе в присутствии частиц активированного угля БАУ (оранжевый маркер) и кварцевого песка (зеленый маркер) от объема введенного флокулянта А-1510 (■ – 0,1 %, ● – 0,5 %, ▲ – 1,0 % раствор реагента)

Fig. 6. Graphic dependence of the agent-in-solution activity value in the presence of BAU activated carbon particles (orange marker) and high-silica sand (green marker) on the volume of the introduced A-1510 flocculant (■ – 0,1 %, ● – 0,5 %, ▲ – 1,0 % agent solution)

Проанализировав полученные в ходе исследований значения, можно сделать вывод о том, что при увеличении объема реагента во всех трех случаях происходит уменьшение величин мутности и цветности надосадочной жидкости, что свидетельствует об усилении флокулирующего эффекта. При этом увеличение объема полиэлектролита в растворе способствует уменьшению величины активности флокулянта (в  $\text{dm}^3/\text{mg}$ ). При увеличении концентрации полиэлектролитов в системах происходит уменьшение величин мутности и цветности надосадочных жидкостей, что свидетельствует об усилении флокулирующего эффекта. Кроме того, при введении равных объемов реагента различной концентрации с увеличением концентрации происходит рост величины активности флокулянта.

**Исследование скорости осветления суспензий в присутствии полиэлектролита.** Исходя из полученных в ходе дальнейших исследований значений параметров, были построены графические зависимости величин оптической плотности систем по времени. Определяемая величина наклона начального прямолинейного участка кривых позволяет рассчитать величины начальных скоростей осаждения дисперсий как

$$\left(-\frac{dA}{d\tau}\right)_{\tau \rightarrow 0} \quad [10; 11].$$

Построенные кинетические кривые различны по своей форме, что свидетельствует о разнообразном характере флокуляции. Необходимо отметить, что процесс осветления завершился в течение полутора минут. Говоря о влиянии концентрации на сам процесс осветления суспензий, можно отметить следующую зависимость: с ростом концентрации для каждого рассматриваемого флокулянта процесс осветления усиливался, соответственно, увеличивалась скорость осаждения частиц. Наибольшую активность демонстрировал флокулянт «Аммиачный». Полученные в ходе исследования данные представлены на рис. 7, 8.

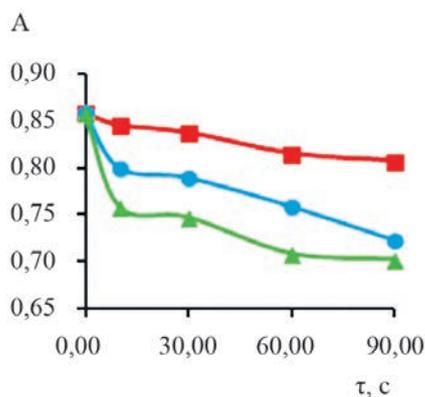


Рис. 7. Кинетические кривые осветления суспензии активированного угля БАУ при введении:

■ – 0,1 %, ● – 0,5 %, ▲ – 1,0 % (раствор реагента «Аммиачный»)

Fig. 7. Kinetic curves of the BAU activated carbon suspension clarification in case of introduction:

■ – 0,1 %, ● – 0,5 %, ▲ – 1,0 % (of the «Ammonia» agent solution)

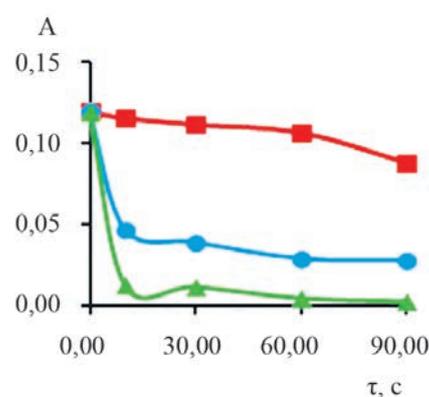


Рис. 8. Кинетические кривые осветления суспензии кварцевого песка при введении:

■ – 0,1 %, ● – 0,5 %, ▲ – 1,0 % (раствор реагента «Аммиачный»)

Fig. 8. Kinetic curves of the high-silica sand suspension clarification in case of introduction:

■ – 0,1 %, ● – 0,5 %, ▲ – 1,0 % (of the «Ammonia» agent solution)

Последующие исследования позволили произвести построение зависимостей скорости осаждения дисперсии от концентраций добавляемых высокомолекулярных полиэлектролитов, на основании которых и были рассчитаны величины начальных скоростей осаждения взвесей активного угля БАУ и кварцевого песка в присутствии флокулянтов (табл. 2).

Таблица 2

Величины начальных скоростей осаждения  $\left(\frac{dA}{d\tau}\right)_{\tau \rightarrow 0}$  взвесей активного угля БАУ и кварцевого песка в присутствии флокулянтов «Аммиачный», А-930 и А-1510 ( $n = 6, P = 0,95, t_p = 2,57$ )

Table 2

Values of the initial precipitation rates of  $\left(\frac{dA}{d\tau}\right)_{\tau \rightarrow 0}$  BAU activated carbon and high-silica sand suspensions in the presence of the «Ammonia», А-930 and А-1510 flocculants ( $n = 6, P = 0,95, t_p = 2,57$ )

Система	Начальная скорость осаждения, $(-dD/d\tau)_{\tau \rightarrow 0} \cdot 10^3, c^{-1}$		
	Концентрация полиэлектролита, %		
	0,1	0,5	1,0
1	Полиэлектролит «Аммиачный»		
Модельная суспензия активного угля БАУ	0,49	1,11	1,74
Модельная суспензия кварцевого песка	0,36	1,02	1,92
2	Полиэлектролит А-930		
Модельная суспензия активного угля БАУ	0,25	1,99	3,32
Модельная суспензия кварцевого песка	2,13	2,56	3,11
3	Полиэлектролит А-1510		
Модельная суспензия активного угля БАУ	0,10	0,44	0,92
Модельная суспензия кварцевого песка	2,13	2,30	2,89

При рассмотрении полученных в ходе экспериментальных значений можно сделать следующий вывод, при применении флокулянтов «Аммиачный», А-930 и А-150 наибольшей величиной скорости осаждения обладают суспензии кварцевого песка в сравнении с суспензиями активного угля БАУ в присутствии рассматриваемых полиэлектролитов, снижающих оптическую плотность суспензий. Полученные значения начальной скорости осаждения частиц свидетельствуют об усилении флокуляционной активности реагентов с ростом их концентрации. При сравнении величин скоростей осаждения наибольшей величиной обладают полиакриламидные флокулянты серии АК-631. Большой активностью обладает флокулянт А-930, чуть меньшей активностью – флокулянт А-1510. Наименьшую величину скорости осаждения взвеси имеет флокулянт «Аммиачный». Можно предположить, что данная закономерность может быть связана с механизмом процесса флокуляции.

Выделяют два основных механизма процесса флокуляции – это нейтрализационный и мостичный механизмы. Первый механизм всегда сопровождается компенсацией локальных зарядов на поверхности частиц за счет адсорбции на них противоположно заряженных повторяющихся звеньев макроиона полиэлектролита. При этом на поверхности происходит формирование «мозаичной» структуры с большим числом контактов реагента с поверхностью частицы. Данный процесс характерен для одноименно заряженных полиэлектролитов. Второй механизм объясняет процесс флокуляции образованием полимерных мостиков между дисперсными частицами и адсорбированным полиэлектролитом. При таком типе взаимодействия адсорбированные макромолекулы полимеров закрепляются на поверхности небольшим числом контактов, слабо деформируются и при этом могут содержать достаточно длинные петли и хвосты, образуя флокулы. В рамках данного практического исследования предполагается наличие именно этого механизма флокулирования между частицами дисперсной фазы.

**Очистка воды от ионов цинка методом пробного флокулирования.** При рассмотрении флокуляции необходимо отметить, что она является процессом агрегации взвешенных частиц при добавлении высокомолекулярных соединений. Их применение позволяет уменьшить продолжительность процесса очистки, дозы

компонента, повысить скорость осаждения образующихся хлопьев. В основе рассматриваемого фотометрического метода лежит определение, основанное на реакции металла с реагентом сульфарсазеном  $[(HO)_2OAsC_6H_3(NO_2)N=NHC_6H_4N=NC_6H_4SO_3Na]$ . С ионами цинка он образует окрашенные в красно-оранжевый цвет комплексные соединения в слабокислой или слабощелочной среде. Данному определению мешают ионы свинца, их влияние устраняется введением тиомочевины. В исследуемые модельные растворы сточных вод объемом  $500\text{ см}^3$  был добавлен небольшими порциями раствор известкового молока для достижения определенного значения кислотности среды, далее в каждый из них помещали растворы высокомолекулярного соединения и определяли величину эффективности очистки по следующему уравнению [10; 11]:

$$\mathcal{E} = \frac{C_0 - C}{C_0} 100 \%, \quad (7)$$

где  $\mathcal{E}$  – эффективность очистки, %;  $C$  – остаточная концентрация,  $\text{г/дм}^3$ ,  $C_0$  – исходная концентрация,  $\text{г/дм}^3$ .

Результаты расчетов эффективности очистки воды, полученные в ходе исследования, приведены на рис. 9.

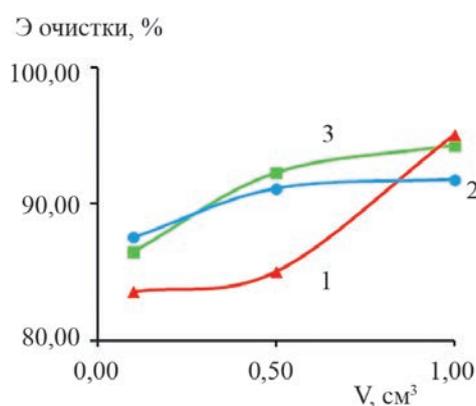


Рис. 9. Графическая зависимость величины эффективности очистки методом пробного флокулирования от объема введенного флокулянта: 1 – «Аммиачный», 2 – А-1510, 3 – А-930

Fig. 9. Graphic dependence of the test flocculation treatment effectiveness value on the volume of the introduced flocculant: 1 – «Ammonia», 2 – А-1510, 3 – А-930

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что эффективность очистки с использованием флокулянта «Аммиачный» находится в пределах величины от 80 до 95 %, что свидетельствует об эффективности рассматриваемого метода очистки СВ от ионов цинка, а также об актуальности рассматриваемой проблемы. Из полученных опытных данных можно сделать вывод о достаточной эффективности рассматриваемого метода.

Кроме того, необходимо отметить, что при применении флокулянтов А-1510 и А-930 также получены весьма эффективные результаты по очистке от ионов цинка. Их величины изменяются в пределах от 86 до 94 % – для флокулянта А-930 и 88 до 92 % – для флокулянта А-1510. Для всех исследуемых систем наблюдается рост эффективности очистки с увеличением концентрации введенного реагента. В ходе дальнейших исследований изучение процесса очистки модельных сточных вод от ионов цинка методом пробного флокулирования будет продолжено. Требуется продолжения сравнительный анализ методов дробного флокулирования с использованием флокулянтов различных классов как синтетической природы, так и натурального происхождения.

### Заключение

Развитие современной промышленности подчас представляет опасность для здоровья населения, постоянно увеличивая уровень загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами. В водной среде, применяя различные методы исследования, можно определить широкий спектр загрязнителей как органического, так и неорганического происхождения. Поэтому улучшение состояния окружающей среды, водных экосистем, в частности, является весьма актуальной задачей для исследователей.

В ходе исследования с применением флокулянтов серии АК-631 и флокулянта «Аммиачный» были получены определенные закономерности процесса очистки модельных систем сточных вод. Рассмотрено

влияние природы и концентрации (поли)электролита на скорость флокуляции суспензий, рассчитаны величины скорости величины начальных скоростей осаждения частиц. Проведен сравнительный анализ применения реагента с полиакриламидными флокулянтами типа АК-631 (А-930 и А-1510).

Опираясь на анализ полученных данных, можно сделать следующий вывод: с увеличением объема введенного флокулянта происходит уменьшение величины мутности модельных систем, которая прямо пропорциональна значениям оптической плотности. Рассчитанные величины определяют величину активности флокулянта.

Похожие зависимости можно отметить и для значений величин эффективности процесса очистки. Достаточно высокие значения данной величины свидетельствуют о том, что флокуляция положительно заряженных дисперсных систем, содержащих ионы металлов, возможна с применением анионных флокулянтов. Но нельзя забывать, что основными характеристиками флокуляционной активности веществ, являются значения эффективности очистки и количества введенного компонента. По значениям эффективности можно говорить о предполагаемом механизме действия веществ.

Следовательно, наибольший интерес для исследования представляют полиакриламидные флокулянты, которые получили широкое применение во многих отраслях промышленности. Говоря о технологических процессах необходимо отметить, что их применение имеет сравнительно низкую себестоимость, доступность и эффективность. Таким образом, для дальнейших исследований по подбору типа флокулянта по минимизации затрат на эксплуатацию очистных сооружений предприятий различных отраслей промышленности и повышения эффективность их работы необходимо провести сравнительный анализ с использованием флокулянтов различных классов как синтетической природы, так и натурального происхождения.

### Библиографические ссылки

1. Соколов ОА, Черников ВА. *Атлас распределения ТМ в объектах окружающей среды*. Москва: Пушино; 1999. 164 с.
2. Рубин А, редактор. *Химия промышленных сточных вод*. Москва: Химия; 1983. 360 с.
3. Гандурина ЛВ. *Органические флокулянты в технологии очистки природных и промышленных сточных вод и обработки осадка*. Москва: ВНИИТПИ; 2000. Выпуск 2. 59 с.
4. Аксенов ВИ. Использование флокулянтов в очистке производственных стоков и осадков. *Экономика и экология*. 2004;2:42–44.
5. Запольский АК, Баран АА. *Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды*. Ленинград: Химия; 1987. 208 с.
6. Куликов НИ, Найманов АЯ, Омельченко НП, Чернышев ВН. *Теоретические основы очистки воды*. Макеевка: Донбасская национальная академия гр-ва и архитектуры; 2009. 297 с.
7. Шачнева ЕЮ. *Физико-химия адсорбции флокулянтов и синтетических поверхностно-активных веществ на сорбенте СВ-1-А* [автореферат диссертации]. Махачкала: [б. и.]; 2011. 23 с.
8. Шачнева ЕЮ. *Физико-химия адсорбции флокулянтов и синтетических поверхностно-активных веществ на сорбенте СВ-1-А* [диссертация]. Махачкала: [б. и.]; 2011. 139 с.
9. Шачнева ЕЮ. Применение флокулянтов серии АК-631 для коагуляционно-флокуляционной очистки сточных вод промышленных предприятий. *Вода и экология: проблемы и решение*. 2017;4(72):62–71. DOI 10.23968/2305–3488.2017.22.4.62–71.
10. Бузаева МВ, Семенов ВВ, Осипов ПО, составители. *Основы промышленной экологии: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Основы промышленной экологии»*. Ульяновск: УлГТУ; 2008. 31 с.
11. Дрябина СС, Шулевич ЮВ, составители. *Методические указания к лабораторным работам № 3, 4 к практикуму по коллоидной химии*. Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ; 2013. 40 с.
12. *Химия процессов очистки природных и сточных вод*. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС; 2014. 92 с.
13. Малышева ЖН, Дрябина СС, Навроцкий АВ, Мохарам Р, Новаков ИА. Кинетика флокуляции суспензии каолина катионными полиэлектролитами. *Известия ВолГТУ*. 2009;3:128–133.
14. Проскурина ВЕ, Мягченков ВА. *Кинетика седиментации суспензии охры в режиме свободного оседания в присутствии полиакриламидных флокулянтов*. Казань: Казанский государственный технологический университет; 2004. 24 с.

### References

1. Sokolov OA, Chernikov VA. *Atlas raspredeleniya TM v obyektakh okruzhayushchey sredy* [Atlas of heavy metals distribution in environment units]. Moscow: Pushkino; 1999. 164 p. Russian.
2. Rubin A, editor. *Khimiya promyshlennykh stochnykh vod* [Chemistry of industrial waste waters]. Moscow: Khimiya; 1983. 360 p. Russian.
3. Gandurina LV. *Organicheskiye flokulyanty v tekhnologii ochistki prirodnykh i promyshlennykh stochnykh vod i obrabotki osadka* [Organic flocculants in the technique of natural and industrial waste water treatment and the precipitates treatment]. Moscow: VNIINTPI; 2000. Volume 2. 59 p. Russian.
4. Aksenov VI. *Ispolzovaniye flokulyantov v ochistke proizvodstvennykh stokov i osadkov* [The use of flocculants in industrial waste water and precipitates treatment]. *Ekonomika i ekologiya*. 2004;2:42–44. Russian.
5. Zapol'skiy AK, Baran AA. *Koagulyanty i flokulyanty v protsessakh ochistki vody* [Coagulants and flocculants in the water treatment processes]. Leningrad: Khimiya; 1987. 208 p. Russian.

6. Kulikov NI, Naymanov AY, Omelchenko NP, Chernyshov VN. *Teoreticheskiye osnovy ochistki vody* [Theoretical foundations of water treatment]. Makeyevka: Donbasskaja natsionalnaja akademiya gr-va i arkhitektury; 2009. 297 p. Russian.
7. Shachneva EY. *Fiziko-khimiya adsorbtsiyi flokulyantov i sinteticheskikh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na sorbente SV-1-A* [Physics/chemistry of flocculants and synthetic surface-active substances with SV-1-A sorbent] [PhD thesis]. Makhachkala: [publisher unknown]; 2011. 23 p. Russian.
8. Shachneva EY. *Fiziko-khimiya adsorbtsiyi flokulyantov i sinteticheskikh poverkhnostnoaktivnykh veshchestv na sorbente SV-1-A* [Physics/chemistry of flocculants and synthetic surface-active substances with SV-1-A sorbent] [dissertation]. Makhachkala: [publisher unknown]; 2011. 139 p. Russian.
9. Shachneva EY. *Primeneniye flokulyantov seriyi AK-631 dlya koagulyatsionno-flokulyatsionnoy ochistki stochnykh vod promyshlennykh predpriyatiy* [The use of AK-631 series flocculants for coagulation/flocculation treatment of industrial waste water]. *Voda I ekologiya: problemy i resheniya*. 2017;4(72):62–71. DOI: 10.23968/2305–3488.2017.22.4.62–71. Russian.
10. Buzayeva MV, Semenov VV, Osipov PO, composition. *Osnovy promyshlennoy ekologiyi: metodicheskiye ukazaniya k laboratornym rabotam po distsipline «Osnovy promyshlennoy ekologiyi»* [Industrial ecology foundations: methodical instructions to laboratory works on the «Foundations of industrial ecology» discipline]. Ulyanovsk: UIGTU; 2008. 31 p. Russian.
11. Dryabina SS, Shulevich YV, composition. *Metodicheskiye ukazaniya k laboratornym rabotam No 3 and 4 on colloid chemistry* [Methodical instructions to colloid chemistry laboratory works No 3 and 4]. Volgograd: IUNL VolgGTU; 2013. 40 p. Russian.
12. *Khimiya protsessov ochistki prirodnykh i stochnykh vod* [Chemistry of the natural and waste water treatment processes]. Khabarovsk: DVGUPS; 2014. 92 p. Russian.
13. Malysheva ZhN, Dryabina SS, Navrotsky AV, Mokharam R, Novakov IA. *Kinetika flokulyatsii suspenzii kaolina kationnymi polielektrolitami* [Kinetics of suspension flocculation by cationic polyelectrolytes]. *Bulletin of Volgograd State Technical University*. 2009;3:128–133. Russian.
14. Proskurina VYe. *Kinetika sedimentatsii suspenzii okhry v rezhime svobodnogo osedaniya v prisutstvii poliakrilamidnykh flokulyantov* [Kinetics of sedimentation of an ochry suspension in the regime of free sedimentation in the presence of polyacrylamide flocculants]. Kazan: Kazan state technological university; 2004. 24 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 15.02.2022.  
Received by editorial board 15.02.2022.

УДК 631.4:577.15

## ФЕРМЕНТАТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫБРОСОВ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. А. САМУСИК<sup>1)</sup>, С. Е. ГОЛОВАТЫЙ<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,  
ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

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

Представлены результаты исследований влияния крупного промышленного предприятия на почвенный покров. Показано, что продукты его функционирования в значительной мере влияют на агрохимические и биологические показатели почв, что сказывается на изменении кислотности дерново-подзолистых супесчаных почв и сдвига показателя  $pH_{KCl}$  в сторону подщелачивания. Установлено, что в данной зоне преобладают почвы со слабощелочными ( $pH_{KCl}$  от 7,06 до 7,42) и щелочными условиями среды ( $pH_{KCl}$  от 7,55 до 8,09). Рассматриваются особенности протекания ферментативных процессов в почвах, подверженных газопылевому загрязнению. Определены уровни активности окислительно-восстановительных (каталазы, дегидрогеназы) и гидролитических (инвертазы, уреазы) ферментов в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям распространения воздушных масс. Наблюдается снижение их активности в дерново-подзолистых супесчаных почвах лесных и сельскохозяйственных земель по мере приближения к источнику загрязнения. Показано, что в радиусе до 2 км от источника загрязнения почвы характеризуются как очень бедные по обогащенности изучаемыми ферментами. По результатам корреляционного анализа отмечается изменение влияния реакции почвенной среды на изученные ферменты статистически достоверной отрицательной взаимосвязью.

**Ключевые слова:** цементное загрязнение; дерново-подзолистые почвы; реакция почвенной среды; ферментативная активность; каталаза; дегидрогеназа; инвертаза; уреазы.

## ENZYMATIC ACTIVITY OF SOD-PODZOLIC SOILS UNDER THE CONDITIONS OF EXPOSURE TO EMISSIONS OF A BUILDING MATERIALS MANUFACTURING ENTERPRISE

E. A. SAMUSIK<sup>a</sup>, S. E. GOLOVATYI<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Yanka Kupala State University of Grodno,  
22 Ažeshka Street, Grodno 230023, Belarus

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

Corresponding author: E. A. Samusik (e.samusik@mail.ru)

### Образец цитирования:

Самусик ЕА, Головатый СЕ. Ферментативная активность дерново-подзолистых почв в условиях воздействия выбросов предприятия по производству строительных материалов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2022;1:104–113.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-104-113>

### For citation:

Samusik EA, Golovaty SE. Enzymatic activity of sod-podzolic soils under the conditions of exposure to emissions of a building materials manufacturing enterprise. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2022;1:104–113. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-104-113>

### Авторы:

**Елена Андреевна Самусик** – старший преподаватель кафедры экологии.

**Сергей Ефимович Головатый** – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; заведующий кафедрой экологического мониторинга и менеджмента.

### Authors:

**Elena A. Samusik**, senior lecture at the department of ecology.  
e.samusik@mail.ru

**Sergey E. Golovaty**, doctor of science (agriculture), full professor; head of the department of environmental monitoring and management.  
sscience@yandex.ru

The article presents the results of studies of the influence of a large industrial enterprise on the soil cover. It is shown that the enterprise for the production of building materials significantly affects the agrochemical and biological indicators of soils. This is manifested primarily in the change in the acidity of soddy-podzolic sandy loamy soils and the shift in the  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  index towards alkalization. It has been established that soils with slightly alkaline ( $\text{pH}_{\text{KCl}}$  from 7.06 to 7.42) and alkaline environmental conditions ( $\text{pH}_{\text{KCl}}$  from 7.55 to 8.09) prevail in this zone. The features of the course of enzymatic processes in soils subject to gas and dust pollution have been established. The levels of activity of redox (catalase, dehydrogenase) and hydrolytic (invertase, urease) enzymes were determined in the distance gradient from the source of pollution and along the directions of air mass propagation. There is a decrease in the activity of these enzymes in soddy-podzolic sandy loamy soils of forest and agricultural lands as one approaches the source of pollution. It is shown that within a radius of up to 2 km from the source of pollution, the soils of forest and agricultural lands are characterized as very poor in terms of enrichment with the studied enzymes. According to the results of the correlation analysis, there is a change in the influence of the reaction of the soil environment on the studied enzymes with a statistically significant negative relationship.

**Keywords:** cement pollution; sod-podzolic soils; reaction of soil environment; enzymatic activity; catalase; dehydrogenase; invertase; urease.

## Введение

Множество одновременно происходящих в почве взаимосвязанных процессов определяется ее генетическими особенностями и регулируется факторами внешнего воздействия. Компонентам почвенного биоценоза свойственно стремление к состоянию динамического равновесия, однако любое воздействие на почвенную среду оказывает влияние состав и деятельность микроорганизмов [1].

В связи с этим возрастает экологическая значимость диагностики экологического состояния почв, являющегося одним из основных критериев оценки уровня антропогенной нагрузки. Как правило, при возрастающем уровне антропогенной нагрузки отмечается ускорение биологического круговорота веществ и изменение биологической активности почв, которое может сопровождаться усиленной минерализацией органического вещества и приводить к развитию процессов, влияющих на снижение плодородия [2].

Для оценки биологического состояния почв в настоящее время используется широкий спектр показателей, что обусловлено многообразием функций почвенных микроорганизмов.

Ферментативная активность – многофункциональная характеристика почв. Почвенные ферменты катализируют разнонаправленные процессы, поэтому для объективной характеристики экологического состояния почвы невозможно выбрать один биохимический показатель [3]. В почвах обнаружены представители всех шести известных современной энзимологии классов ферментов, однако наиболее значимую роль играют 2 класса – гидролитические и окислительные ферменты [4].

Интенсивность ферментативных процессов зависит от конкретных условий: наличия и концентрации субстрата, значений pH, температуры, влажности и др. Изучение влияния pH почвы на ее биологическую активность имеет экологическую значимость. При неблагоприятных показателях реакции почвенной среды снижается численность населяющих ее микроорганизмов, отмечаются негативные изменения структуры микробных сообществ. Важнейшие ферменты, связанные с циклами основных биогенных элементов, могут при этом частично денатурировать, что приводит к нарушению круговорота биогенных элементов и процессов формирования гумуса [2; 5].

Окислительно-восстановительные и гидролитические ферменты выступают объектами особого внимания при изучении изменения почвенных процессов под воздействием антропогенных факторов. В связи с этим является актуальным количественная оценка активности окислительно-восстановительных (каталазы, дегидрогеназы) и гидролитических (инвертазы, уреазы) ферментов в дерново-подзолистых почвах в зоне влияния выбросов предприятия по производству строительных материалов (на примере ОАО «Красносельскстройматериалы», Беларусь).

## Материалы и методы исследования

Объектом исследования служили образцы дерново-подзолистых супесчаных почв лесных и прилегающих к ним сельскохозяйственных земель, отобранные на разном расстоянии от предприятия (1; 1,5; 2; 2,5; 3,5; 5 (6,5); 8; 15 км) с учетом «розы ветров» (СЗ, ЮЗ, СВ, ЮВ). Отбор проб проводился в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01–83<sup>1</sup>, ГОСТ 28168–89<sup>2</sup>. Отбор контрольных (фоновых) образцов почвы был осуществлен на расстоянии 15 км от источника загрязнения.

Климатические условия территории, прилегающей к цементному предприятию, оценивали по метеорологическим показателям Волковысской метеорологической станции. Преобладающими ветрами на

<sup>1</sup>ГОСТ 17.4.3.01–83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. Введен 01.07.84. Москва: Издательство стандартов; 1984.

<sup>2</sup>ГОСТ 28168–89. Почвы. Отбор проб. Введ. 01.04.90. Москва: Издательство стандартов; 1990.

протяжении всего года являются ветры западных и южных направлений. На рис. 1 приведена «роза ветров» в зимние, летние месяцы и за год в целом.

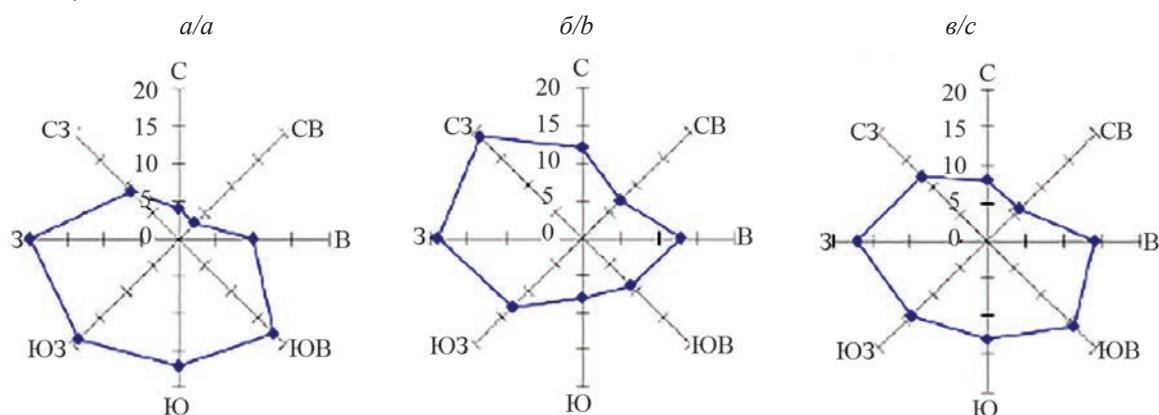


Рис. 1. Повторяемость направлений ветра (а – январь, б – июль, в – среднегодовая)<sup>3</sup>

Fig. 1. Repeatability of wind directions (a – January, b – July, c – average annual rate)<sup>3</sup>

Почвенный покров территории исследования представлен дерново-подзолистыми супесчаными почвами на моренных связных песках и супесчаными почвами на моренных пылевато-песчанистых рыхлых супесях. Пробы почвенных образцов отбирали с помощью пробоотборника из горизонта 0–20 см. На каждой пробной площадке (n = 60) отбирали по пять точечных проб.

Исследования биологической активности проводили в образцах летнего периода отбора (июль). Ферментативная диагностика почвы проведена по гидролитическим (уреаза, инвертаза) и окислительным (каталаза, дегидрогеназа) ферментам. Для определения активности инвертазы использовали физический метод В. Ф. Купревича и Т. А. Щербаковой с использованием сахарозы в качестве ферментного субстрата. Уреазную активность определяли по методу Т. А. Щербаковой, ферментным субстратом служила мочеви́на. Каталазную активность определяли газометрическим методом. Для определения активности дегидрогеназы применяли метод Ленарда в модификации А. Ш. Галстяна. Ферментативную активность почв определяли в пятикратной повторности в воздушно-сухих образцах [6].

Статистическая обработка данных включала: оценку формы распределения полученных данных с помощью гистограмм и критериев Колмогорова–Смирнова с поправкой Лиллиефорса и Шапиро–Уилка, а также корреляционный, дисперсионный и кластерный анализ. Процедура кластерного анализа выполнялась методом иерархической агломеративной кластеризации. В качестве меры расстояния использовался квадрат расстояния Евклида, классификация проводилась методом Варда [7]. Критическое значения уровня значимости принималось равным 5%. Анализ данных проводился с помощью пакетов программ *Excel 2016* и *Statistica 10*.

### Результаты исследования и их обсуждение

Одним из важных показателей состояния почвы и степени ее трансформации является реакция почвенной среды, с которой тесно взаимосвязаны процессы превращения минеральной и органической составляющих почв. Газопылевые выбросы, в том числе и цементная пыль, от изучаемого промышленного объекта через атмосферные потоки приходят на земную поверхность, где оказывают определенное влияние на свойства почв. В наших исследованиях установлено, что это влияние приводит к изменению кислотно-щелочных условий почв. В табл. 1 представлен диапазон варьирования значений  $pH_{KCl}$  почвенных образцов территорий, прилегающих к предприятию по производству строительных материалов. Анализ данных по кислотности дерново-подзолистых супесчаных почв показал преобладание слабощелочных (при значениях  $pH_{KCl}$  от 7,06 до 7,42) и щелочных условий (при значениях  $pH_{KCl}$  от 7,55 до 8,09).

Диапазон варьирования усредненных значений кислотности в градиенте расстояния от источника загрязнения и в зависимости от направления ветра для почвенных образцов лесных земель составил  $pH_{KCl}$  6,46–6,91, для сельскохозяйственных земель –  $pH_{KCl}$  6,31–7,02, (рис. 2, 3). Следует отметить, что для почвенных образцов лесных земель с учетом «розы ветров» статистически достоверной разницы между средними значениями  $pH_{KCl}$  выявлено не было, однако зафиксированы статистически достоверные

<sup>3</sup> Оценка воздействия на окружающую среду [Электронный ресурс]. URL: <https://volkovysk.grodno-region.by/uploads/files/OVOS-dlja-obsuzhdenij.pdf> (дата обращения: 10.01.2022).

различия для почв сельскохозяйственных земель северо-восточного и юго-восточного направлений ( $p=0,000725$ ).

Таблица 1

Реакция дерново-подзолистых почв в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям распространения воздушных масс

Table 1

The reaction of sod-podzolic soils in the gradient of the distance from the source of pollution and in the directions of distribution of air masses

Показатель		Направление ветра	Расстояние от источника загрязнения, км							
			1	1,5	2	2,5	3,5	5 (6,5)	8	контроль (фон)
рН <sub>KCl</sub>	лес	ЮЗ	6,81	7,20	7,06	7,31	6,21	6,10	—*	6,07
		ЮВ	7,35	7,61	6,71	—	5,21	—	5,32	6,10
		СЗ	7,42	7,55	—	—	6,95	6,82	5,67	3,99
		СВ	—	7,57	—	7,25	6,87	7,90	4,79	6,12
	поле	ЮЗ	—	—	—	—	—	—	—	—
		ЮВ	7,20	7,21	—	—	4,77	6,02	6,32	4,03
		СЗ	—	6,91	6,92	—	6,90	6,83	6,38	5,47
		СВ	7,57	—	7,30	7,25	7,12	8,09	—	4,67

Примечание. \*Отсутствие возможности отбора проб почвенных образцов в связи с неоднородностью рельефа.

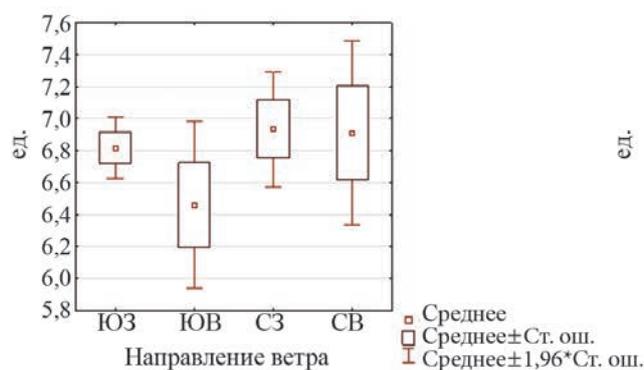


Рис. 2. Диаграмма размаха средних значений рН<sub>KCl</sub> почв лесных земель по направлениям ветра

Fig. 2. Diagram of the range of average values of рН<sub>KCl</sub> of soils of forest lands in wind directions

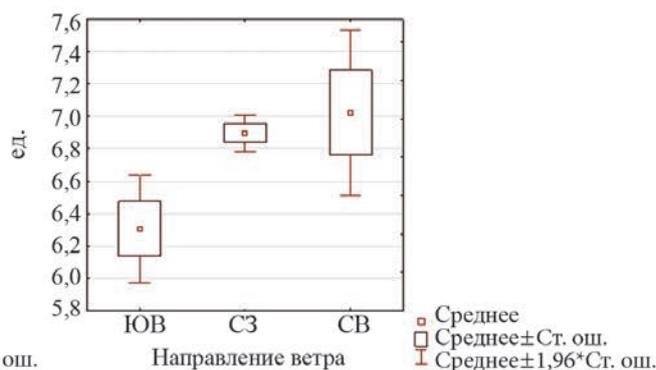


Рис. 3. Диаграмма размаха средних значений рН<sub>KCl</sub> почв сельскохозяйственных земель по направлениям ветра

Fig. 3. The diagram of the span of the average values of рН<sub>KCl</sub> of soils of agricultural lands in the wind directions

Результаты иерархического кластерного анализа средних значений рН<sub>KCl</sub> почв лесных земель иллюстрирует рис. 4. На основании анализа полученных данных можно выделить 3 группы значений изучаемого фактора, близких по средним значениям рН<sub>KCl</sub> почв лесных земель в градиенте расстояния от источника загрязнения: 1–2,5 км – рН<sub>KCl</sub> 7,3; 3,5–6,5 км – рН<sub>KCl</sub> 6,6; 8–15 км – рН<sub>KCl</sub> 5,4 (рис. 5).

Результаты иерархического кластерного анализа средних значений рН<sub>KCl</sub> почв сельскохозяйственных земель представлены на рис. 6. Выверенные данные свидетельствуют, что выделяются 3 группы близких по средним значениям кислотности в градиенте расстояния от источника загрязнения: 1,0–1,5 км – рН<sub>KCl</sub> 7,2; 2–6,5 км – рН<sub>KCl</sub> 6,8; 8–15 км – рН<sub>KCl</sub> 5,4 (рис. 7).

Непараметрический тест сравнения групп кластеров (по критерию Краскела–Уоллиса) рН<sub>KCl</sub> дерново-подзолистых почв лесных и сельскохозяйственных земель в градиенте расстояния от источника загрязнения показал статистически достоверные отличия между 1 и 3 кластерами с  $p=0,00043$  и  $p=0,00566$  соответственно (рис. 5 и 7). Следует отметить, что реакция почвенной среды, классифицируемая иерархическим кластерным анализом в градиенте расстояния от источника загрязнения, независимо от розы ветров, изменялась линейно.

Для изученных дерново-подзолистых почв сельскохозяйственных земель установлена зона максимального влияния газопылевых выбросов цементного предприятия на реакцию почвы в градиенте 1–1,5 км, а для лесных земель – 1–2,5 км от источника загрязнения.

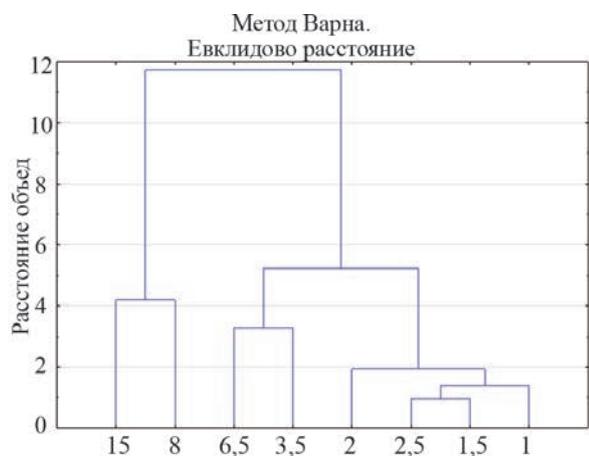


Рис. 4. Дендрограмма классификации средних значений  $pH_{KCl}$  почв лесных земель

Fig. 4. Dendrogram of classification of average values of  $pH_{KCl}$  of soils of forest lands

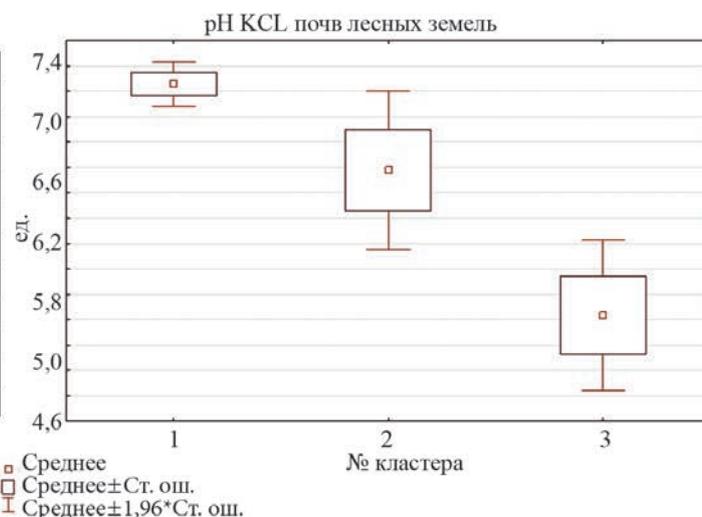


Рис. 5. Сравнение групп (кластеров) средних значений показателя  $pH_{KCl}$  почв лесных земель

Fig. 5. Comparison of groups (clusters) of average values of the  $pH_{KCl}$  index of soils of forest lands

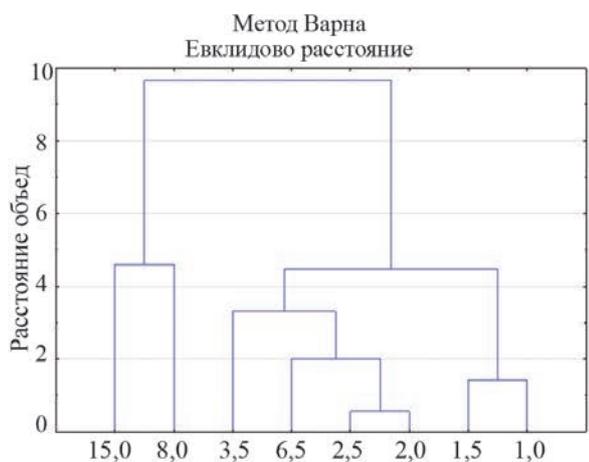


Рис. 6. Дендрограмма классификации средних значений  $pH_{KCl}$  почв сельскохозяйственных земель

Fig. 6. Dendrogram of classification of average values of  $pH_{KCl}$  of soils of agricultural lands

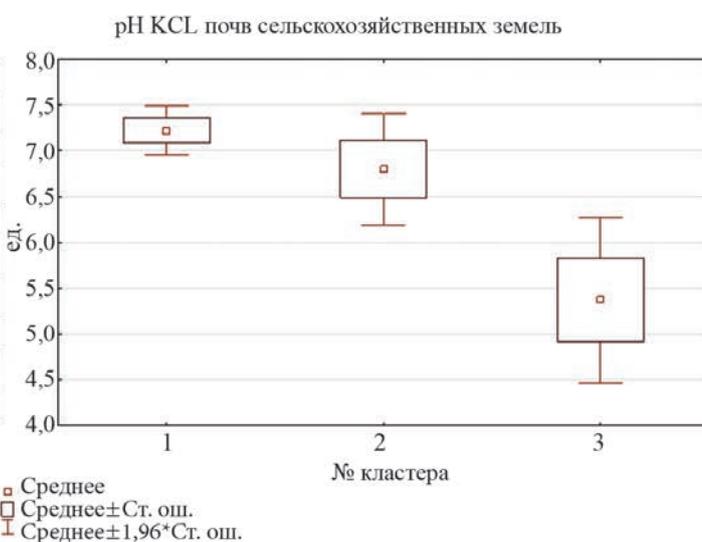


Рис. 7. Сравнение групп (кластеров) средних значений  $pH_{KCl}$  почв сельскохозяйственных земель

Fig. 7. Comparison of groups (clusters) of average  $pH_{KCl}$  values of soils of agricultural lands

Одним из характерных показателей биологической активности почвы является активность каталазы. Каталаза разлагает ядовитую для клеток перекись водорода, образующуюся в процессе дыхания живых организмов и в результате различных биохимических реакций окисления органических веществ.

Для изучаемых дерново-подзолистых супесчаных почв, испытывающих воздействие газопылевых выбросов предприятия по производству цемента, нами установлены следующие количественные значения каталазной активности, представленные в табл. 2.

Диапазон изменения активности каталазы в градиенте расстояния 1–8 км от источника загрязнения варьирует по всем направлениям ветра (за исключением юго-западного) в почвах лесных земель в пределах 0,98–1,26 мг, в почвах сельскохозяйственных земель – 0,87–1,24 мл  $O_2$  на 1 г в.-с. почвы за 1 мин. Максимальная каталазная активность в наших исследованиях установлена в почвах под лесным фитоценозом юго-западного направления, где составляла 1,53 мл  $O_2$  на 1 г в.-с. почвы за 1 мин.

В соответствии со шкалой оценки степени обогащенности почв ферментами (каталазой), разработанной Д. Г. Звягинцевым [7], установлено, что почвы лесных и сельскохозяйственных земель во всех направлениях (за исключением юго-западного) в радиусе 2 км от источника загрязнения относятся к очень бедным, то есть  $< 1$  мл  $O_2$  на 1 г в.-с. почвы за 1 мин.

Таблица 2

**Каталазная активность дерново-подзолистых почв в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям распространения воздушных масс**

Table 2

**Catalase activity of sod-podzolic soils in the gradient of the distance from the source of pollution and in the directions of distribution of air masses**

Показатель		Направление	Расстояние от источника загрязнения, км							
			1	1,5	2	2,5	3,5	6,5(5,0)	8	контроль
Каталаза, мл О <sub>2</sub> /1 г/1 мин.	лес	ЮЗ	1,3	1,3	1,4	1,4	1,8	1,9	–	4,0
		ЮВ	0,4	0,9	1,6	–	1,6	–	1,9	7,0
		СЗ	0,8	0,9	–	–	1,1	1,5	2,0	2,1
		СВ	–	0,4	–	1,1	1,2	0,6	1,6	3,2
	поле	ЮЗ	–	–	–	–	–	–	–	–
		ЮВ	0,6	0,6	–	–	1,7	2,0	1,7	3,0
		СЗ	–	0,7	0,9	–	1,0	0,7	1,8	2,1
		СВ	0,5	–	0,5	0,5	1,2	1,2	–	1,3

Для оценки общего уровня биогенности почвы в наших исследованиях использовалась дегидрогеназная активность. Как известно, дегидрогеназы имеются у абсолютного большинства микроорганизмов, они характеризуют интенсивность процессов дегидрирования органических субстратов и метаболическую активность микрофлоры. В отличие от других ферментов, дегидрогеназы не имеют внеклеточного компонента, они не адсорбируются и не накапливаются в почве, дегидрирование органического субстрата идет за счет дегидрогеназ живых микробных клеток [9].

Именно поэтому дегидрогеназная активность относится к наиболее объективным характеристикам как актуальной численности, так и метаболической активности микробных сообществ почвы.

Для дерново-подзолистых супесчаных почв, испытывающих воздействие газопылевых выбросов предприятия по производству цемента, установлены значения дегидрогеназной активности, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Дегидрогеназная активность дерново-подзолистых почв в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям распространения воздушных масс**

Table 3

**Dehydrogenase activity of sod-podzolic soils in the gradient of the distance from the source of pollution and in the directions of distribution of air masses**

Показатель		Направление	Расстояние от источника загрязнения, км							
			1	1,5	2	2,5	3,5	6,5(5,0)	8	контроль
ДГ, мг ТФФ/10 г/24 ч	лес	ЮЗ	2,4	2,0	1,9	1,0	0,4	0,7	–	2,5
		ЮВ	0,3	0,4	1,1	–	0,7	–	1,4	3,6
		СЗ	0,6	0,2	–	–	0,6	0,2	0,4	1,0
		СВ	–	0,2	–	0,3	0,5	0,8	0,7	5,3
	поле	ЮЗ	–	–	–	–	–	–	–	–
		ЮВ	0,3	0,5	–	–	0,3	0,6	0,4	0,8
		СЗ	–	1,1	2,2	–	0,2	0,2	2,5	2,6
		СВ	2,1	–	0,9	1,1	0,4	2,1	–	2,3

В результате проведенных исследований установлено, что минимальной дегидрогеназной активностью обладают почвы сельскохозяйственных земель юго-восточного направления в градиенте расстояния от источника загрязнения. В соответствии со шкалой оценки степени обогащенности почв ферментами (дегидрогеназа), по Д. Г. Звягинцеву [8], установлено, что данные почвы относятся к очень бедным, то есть < 1 мг ТФФ на 10 г в.-с. почвы за 24 ч. Снижение этого показателя свидетельствует об ухудшении условий для жизнедеятельности микроорганизмов, выделяющих дегидрогеназы.

Для выявления влияния отдельных экологических параметров нами была проведена обработка полученных данных многофакторным дисперсионным анализом.

Результаты дисперсионного анализа для изученных дерново-подзолистых супесчаных почв лесных и сельскохозяйственных земель, прилегающих к изучаемому предприятию, представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты многофакторного дисперсионного анализа влияния расстояния от источника загрязнения и реакции почвенной среды на каталазную активность почв лесных земель и сельскохозяйственных земель**

Table 4

**Results of multivariate dispersion analysis of the influence of the distance from the source of pollution and the reaction of the soil environment on the catalase activity of soils of forest lands and agricultural lands**

Показатель		Статистические показатели	Расстояние от источника загрязнения	Реакция среды (pH <sub>KCl</sub> )
Каталаза, мл O <sub>2</sub> /1 г/1 мин	лес	η <sup>2</sup> , %	64,8	71,6
		F	4,99	11,59
		P	<b>0,002*</b>	<b>0,000011</b>
	поле	η <sup>2</sup> , %	62,8	90,2
		F	2,81	20,34
		P	0,072	<b>0,000032</b>

Примечание. \*Жирным шрифтом выделены значения при  $p < 0,05$ .

На основе дисперсионного анализа установлено, что существует тесная отрицательная корреляционная связь между активностью каталазы в почвенных образцах и расстоянием от источника загрязнения. По активности дегидрогеназы в почвенных образцах такой зависимости не установлено.

На активность каталазы для почв лесных земель сила влияния расстояния от источника загрязнения составила 64,8 % и для сельскохозяйственных земель – 62,8 %. При этом сила влияния реакции почвенной среды (pH<sub>KCl</sub>) на активность фермента каталазы для почв лесных земель составила от 71,6 %, а для почв сельскохозяйственных земель – 90,2 %. Отмечено изменение влияния реакции почвенной среды на активность каталазы отрицательной взаимосвязью (для почв лесных земель –  $r = -0,86$ , а для почв сельскохозяйственных земель –  $r = -0,74$  при  $p < 0,05$ ).

Гидролитические ферменты обеспечивают ускоренное протекание сложных многостадийных процессов минерализации разнообразных по химическому составу органических соединений и высвобождение элементов питания [10; 11]. Однако по значимости можно выделить ключевые гидролитические ферменты, связанные с разложением наиболее распространенных в почве форм нахождения основных биогенных элементов, углерода и азота. Преобладающие формы органического углерода в почвах – поли- и олигосахариды [14], их минерализация – самый масштабный деструкционный процесс [4]. В связи с этим интенсивность минерализации в цикле углерода целесообразно оценивать по гидролитической деградации поли- и олигосахаридов с учетом того, что наиболее объективную оценку интенсивности процесса дает определение активности ферментов завершающих стадий гидролиза, когда в почву непосредственно поступают конечные продукты – моносахариды [8].

Выбор инвертазной активности в качестве диагностического показателя обусловлен ее критической ролью в высвобождении низкомолекулярных сахаров, глюкозы и фруктозы, которые являются основным источником энергии для микроорганизмов.

Для изучаемых дерново-подзолистых супесчаных почв, испытывающих воздействие газопылевых выбросов предприятия по производству цементного, установлены значения инвертазной активности, которые представлены в табл. 5.

В результате проведенных исследований выявлено, что минимальной инвертазной активностью обладают почвы лесных земель юго-восточного направления (2,4–3,4 мг глюкозы/1г/24ч) и сельскохозяйственных земель северо-восточного направления (1,5–3,0 мг глюкозы/1г/24ч). В соответствии со шкалой оценки степени обогащенности почв ферментами (инвертаза), по Д. Г. Звягинцеву, установлено, что данные почвы относятся к очень бедным, то есть <5 мг глюкозы/1 г/24 ч. Низкий уровень активности инвертазы свидетельствует об ухудшении условий для жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, что проявляется в снижении развития микробной биомассы и нарушении определенного уровня биогенности почвы.

Таблица 5

**Инвертазная активность дерново-подзолистых почв в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям распространения воздушных масс**

Table 5

**Invertase activity of sod-podzolic soils in the gradient of the distance from the source of pollution and in the directions of distribution of air masses**

Показатель	Направление	Расстояние от источника загрязнения, км								
		1	1,5	2	2,5	3,5	6,5	8	контроль	
Инвертаза, мг глюкозы/1 г/24 ч	лес	ЮЗ	7,8	8,2	7,7	6,6	6,6	9,7	–	10,1
		ЮВ	2,4	3,5	4,1	–	4,95	–	3,4	3,6
		СЗ	12	9,9	–	–	8,8	10,9	8,7	13,8
		СВ	–	6,64	–	5,8	8,4	6,1	6,3	9,1
	поле	ЮЗ	–	–	–	–	–	–	–	–
		ЮВ	6,8	5	–	–	3,8	2,6	7,6	13,2
		СЗ	–	6,3	10,6	–	8,6	8,5	13,7	14,9
		СВ	2,6	–	2,69	2,95	1,495	9,38	–	10,85

Известно, что в почвах наиболее широко распространены амидные формы органического азота [12]. В цикле азота универсальным деградационным процессом является аммонификация, в результате которой азот органических соединений становится доступным для растений. На завершающих стадиях аммонификации, обеспечивающих образование аммония, действуют амидогидролазы, к которым относятся уреазы. Активность минерализации в цикле азота целесообразно определять по активности уреаз, играющих критическую роль в высвобождении неорганического азота, который непосредственно ассимилируется растениями и микроорганизмами.

Сравнительный анализ данных по уреазной активности (табл. 6) показывает, что в почвах лесных и сельскохозяйственных земель северо-восточного направлений отмечается уменьшение активности уреазы, свидетельствующее о снижении интенсивности накопления минерального азота в почве.

Таблица 6

**Уреазная активность дерново-подзолистых почв в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям распространения воздушных масс**

Table 6

**Urease activity of sod-podzolic soils in the gradient of the distance from the source of pollution and in the directions of distribution of air masses**

Показатель	Направление	Расстояние от источника загрязнения, км								
		1	1,5	2	2,5	3,5	6,5	8	контроль	
Уреаза, мг (N-NH <sub>4</sub> )/1 г/4 ч	лес	ЮЗ	148,8	143,8	130,3	126,5	126,5	129,5	–	165,5
		ЮВ	74,8	123,3	109,8	–	136,3	–	145,3	161,5
		СЗ	114,8	103,3	–	–	98,5	119,3	114,0	147,0
		СВ	–	90,4	–	94,2	69,5	74,3	165,3	173,0
	поле	ЮЗ	–	–	–	–	–	–	–	–
		ЮВ	153,3	117,0	–	–	122,3	100,5	180,3	183,0
		СЗ	–	140,5	103,8	–	110,5	135,3	130,3	191,3
		СВ	89,7	–	80,1	113,5	77,0	92,0	–	118,3

По результатам корреляционного анализа, представленных в табл. 5, отмечается изменение влияния реакции почвенной среды на изученные ферменты статистически достоверной отрицательной взаимосвязью.

Многими исследователями отмечена корреляционная взаимосвязь между активностью инвертазы и активностью других почвенных карбогидраз [13]. В наших исследованиях обнаружена тесная взаимосвязь между активностью инвертазы и дегидрогеназной активностью ( $r = 0,75-0,81$  при  $p < 0,05$ ), что свидетельствует о преимуществе в почве инвертазы микробного происхождения. Снижение инвертазной активности в почве способствует снижению метаболической активности почвенных микробных сообществ.

Таблица 7

**Результаты корреляционного анализа взаимосвязи показателей ферментативной активности и реакции почвенной среды для почв лесных и сельскохозяйственных земель по направлениям**

Table 7

**Results of correlation analysis of the relationship between indicators of enzymatic activity and the reaction of the soil environment for soils of forest and agricultural lands in the following directions**

Дегидрогеназа				Каталаза				Уреаза				Инвертаза			
Почвы под лесом															
ЮЗ	ЮВ	СЗ	СВ	ЮЗ	ЮВ	СЗ	СВ	ЮЗ	ЮВ	СЗ	СВ	ЮЗ	ЮВ	СЗ	СВ
–	<b>–0,54</b>	<b>–0,46</b>	–		<b>–0,64</b>	<b>–0,94</b>	<b>–0,89</b>	–	<b>–0,60</b>	<b>–0,60</b>	<b>–0,60</b>	–	<b>–0,49</b>	–	<b>–0,43</b>
Почвы сельскохозяйственных угодий															
–	<b>–0,43</b>	<b>–0,65</b>	–	–	<b>–0,93</b>	<b>–0,65</b>	<b>–0,51</b>	–	–	<b>–0,58</b>	–	–	–	<b>–0,69</b>	–

Примечание. \*Жирным шрифтом выделены значения при  $p < 0,05$ .

## Заключение

Результаты исследований подтверждают значимость ферментативной активности в качестве диагностических показателей экологического состояния почвы. Для изученных дерново-подзолистых супесчаных почв лесных и сельскохозяйственных земель установлены уровни активности почвенных ферментов: каталазы, дегидрогеназы, инвертазы и уреазы в условиях воздействия предприятия по производству строительных материалов. Отмечено снижение активности окислительных и гидролитических ферментов по мере приближения к источнику загрязнения. По результатам корреляционного анализа отмечается изменение влияния реакции почвенной среды на изученные ферменты статистически достоверной отрицательной взаимосвязью.

## Библиографические ссылки

1. Мамитко АВ, Никитина ЗИ. Динамика микробных популяций в разных почвах. Биодинамика и плодородие почвы. Таллин: [б. и.]; 1979. с. 64–68.
2. Туев НА. Микробиологические процессы гумусообразования. Москва: Агропромиздат; 1989. 237 с.
3. Bandick AK, Dick RP. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 1999;31(11):1471–1479.
4. Звягинцев ДГ, Бабьева ИЛ, Зенова ГМ. Биология почв. Москва: МГУ; 2005. 445 с.
5. Tabatabai MA, et al. Soils enzymes. Methods of soil analysis : microbiological and biochemical properties. *Soil Science Society of America*. 1994;5:775–833.
6. Хазиев ФХ. Методы почвенной энзимологии. Москва: Наука; 2005. 252 с.
7. Буреева НН. Многомерный статистический анализ с использованием ППП «Statistica». Нижний Новгород: [б. и.]; 2007. 112 с.
8. Звягинцев ДГ. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей. *Почвоведение*. 1978;6:48–52.
9. Петерсон НВ, Периг ГТ. Окислительно-восстановительные условия и дегидрогеназная активность в некоторых почвах западных областей Украины. *Научные труды Львовского СХИ*. 1968;17:76–84.
10. Dick RP. Enzymes in the Environment: Activity, Ecology & Applications. Granada, Spain: [publisher unknown]; 1999. p. 164.
11. Speir TW, Ross DJ. Hydrolytic Enzyme Activities to Assess Soil Degradation and Recovery. *Enzymes in the Environments: Activity, Ecology and Applications*. 2002;2:407–431.
12. Knicker H, Lüdemann HD, Haider K. Incorporation studies of  $\text{NH}_4^+$  during incubation of organic residues by  $^{15}\text{N}$ -CPMAS-NMR-spectroscopy. *European Journal Soil Science*. 1997;48:431–441.
13. Галстян АШ. Ферментативная активность почв Армении. Ереван: Айстан; 1974. 260 с.

## References

1. Mamitko AV, Nikitina ZI. *Dinamika mikrobnnykh populyatsiy v raznykh pochvakh. Biodinamika i plodorodiye pochvy* [Dynamics of microbial populations in different soils. Biodynamics and soil fertility]. Tallinn: [publisher unknown]; 1979. p. 64–68. Russian.
2. Tuvе NA. *Mikrobiologicheskiye protsessy gumusobrazovaniya* [Microbiological processes of humus formation]. Moscow: Agropromizdat; 1989. 237 p. Russian.
3. Bandick AK, Dick RP. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 1999;31(11):1471–1479.
4. Zvyagintsev DG, Babieva IL, Zenova GM. *Biologiya pochv* [Biology of soils]. Moscow: MSU; 2005. 445 p. Russian.
5. Tabatabai MA, et al. Soils enzymes. Methods of soil analysis : microbiological and biochemical properties. *Soil Science Society of America*. 1994;5:775–833.
6. Khaziev FH. *Metody pochvennoy enzimologii* [Methods of soil enzymology]. Moscow: Nauka; 2005. Russian.
7. Bureeva NN. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz s ispolzovaniyem PPP «Statistica»* [Multivariate statistical analysis using the «Statistica» PPP]. Nizhny Novgorod: [publisher unknown]; 2007. 112 p. Russian.
8. Zvyagintsev DG. Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators. *Pochvovedenie* [Soil science]. 1978;6:48–52. Russian.
9. Peterson NV, Perig GT. Redox conditions and dehydrogenase activity in some soils of the western regions of Ukraine. *Scientific works of the Lviv SCI*. 1968;17:76–84. Russian.
10. Dick RP. Enzymes in the Environment: Activity, Ecology & Applications. Granada, Spain: [publisher unknown]; 1999. p. 164.
11. Speir TW, Ross DJ. Hydrolytic Enzyme Activities to Assess Soil Degradation and Recovery. *Enzymes in the Environments: Activity, Ecology and Applications*. 2002;2:407–431.
12. Knicker H, Lüdemann HD, Haider K. Incorporation studies of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> during incubation of organic residues by 15N-CPMAS-NMR-spectroscopy. *European Journal Soil Science*. 1997;48:431–441.
13. Galstyan AL. *Fermentativnaya aktivnost' pochv Armenii* [Enzymatic activity of Armenian soils]. Yerevan: Aistan; 1974. 260 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 11.02.2022.  
Received by editorial board 11.02.2022.

# СОДЕРЖАНИЕ

## СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

<i>Тимофеев А. Н.</i> Историко-культурное значение и правовые аспекты охраны древних дорог .....	4
<i>Дубенок С. А., Кулаков А. Ю., Конончук Т. П.</i> Методология разработки и формирования рейтинга экологического развития регионов Республики Беларусь .....	14

## ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Пашкевич Л. В., Кабашишникова Л. Ф.</i> Научные основы использования салицилатов в адаптивных технологиях возделывания ярового ячменя .....	25
<i>Пашкевич А. М., Чайковский А. И., Рупасова Ж. А., Василевская Т. И., Криницкая Н. Б.</i> Влияние продолжительности светодиодного освещения на биохимический состав микрорезелени гороха овощного.....	37

## РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Дроздович В. В.</i> Дозы облучения щитовидной железы населения после Чернобыльской аварии .....	46
<i>Герменчук М. Г., Журавков В. В.</i> Ретроспективная оценка и моделирование радиоактивного загрязнения территории Республики Беларусь в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС.....	56

## МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Масалкова Ю. Ю., Беляева Д. И.</i> Особенности заболеваемости раком молочной железы (по данным Витебского областного клинического онкологического диспансера).....	68
---	----

## ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Улащик Е. А., Мисюченко В. М., Никитич А. Д.</i> Внедрение технологии по максимальному вовлечению отходов кондитерских производств в хозяйственный оборот Республики Беларусь .....	75
<i>Цыбулько Н. Н., Жукова И. И., Юхновец А. В.</i> Потери органического вещества и элементов питания при водной эрозии почв на склоновых землях .....	84
<i>Шачнева Е. Ю.</i> Исследование процесса очистки воды с применением флокулянта «Аммиачный» на примере модельных систем сточных вод .....	94
<i>Самусик Е. А., Головатый С. Е.</i> Ферментативная активность дерново-подзолистых почв в условиях воздействия выбросов предприятия по производству строительных материалов.....	104

## CONTENTS

### SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

<i>Timofeev A. N.</i> Historical and cultural significance and legal aspects of protection of ancient roads.....	4
<i>Dubianok S. A., Kulakou A. Ju., Kononchuk T. P.</i> Methodology for developing and ranking the environmental development of the regions of the Republic of Belarus.....	14

### THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Pashkevich L. V., Kabashnikova L. F.</i> Scientific basis of the use of salicylates in adaptive technologies of spring barley cultivation.....	25
<i>Pashkevich H. M., Tcaikovskiy A. I., Rupasova Z. A., Vasilevskaya T. I., Krinitckaya N. B.</i> The influence of the duration of led lighting on the biochemical composition of the peas microgreens .....	37

### RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Drozdvovich V. V.</i> Thyroid doses of the population after the Chernobyl accident.....	46
<i>Germenchuk M. G., Zhuravkov V. V.</i> Retrospective assessment and modeling of radioactive contamination of the territory of the Republic of Belarus as a result of the disaster at the Chernobyl NPP .....	56

### MEDICAL ECOLOGY

<i>Masalkova Yu. Yu., Beliaeva D. I.</i> Peculiarities of breast cancer incidence according to Vitebsk Regional Clinical Oncological Dispenser. ....	68
--	----

### INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Ulashchik E. A., Misiuchenka V. M., Nikitich A. D.</i> Justification of technology for the maximum involvement of waste from confectionery productions in the economic turnover in the Republic of Belarus .....	75
<i>Tsybulka M. M., Zhukova I. I., Yukhnovets A. V.</i> Loss of organic matter and nutrients at soil water erosion on slope lands.....	84
<i>Shachneva E. Yu.</i> Study of the process of water purification using flocculant «Ammonia» on the example of model wastewater systems .....	94
<i>Samusik E. A., Golovatyi S. E.</i> Enzymatic activity of sod-podzolic soils under the conditions of exposure to emissions of a building materials manufacturing enterprise.....	104

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

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

**Журнал Белорусского  
государственного университета. Экология.  
№ 1. 2022**

Учредитель:  
Белорусский государственный университет

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

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

Тел. 398-89-34, 398-93-44.

www.iseu.bsu.by

E-mail: jecology@bsu.by

«Журнал Белорусского государственного  
университета. Экология» издается с сентября 2017 г.  
До августа 2017 г. выходил под названием  
«Экологический вестник»  
(ISSN 1994-2087).

Редактор *Л. М. Корневская*  
Технический редактор *М. Ю. Мошкова*  
Корректор *М. Ю. Мошкова*

Подписано в печать 25.03.2022.  
Тираж 100 экз. **Заказ**.

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

© БГУ, 2022

**Journal  
of the Belarusian State University. Ecology.  
No. 1. 2022**

Founder:  
Belarusian State University

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

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

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

www.iseu.bsu.by

E-mail: jecology@bsu.by

«Journal of the Belarusian State University. Ecology»  
published since September, 2017.  
Until August, 2017 named «Ekologičeskii vestnik»  
(ISSN 1994-2087).

Editor *L. M. Korenevskaya*  
Technical editor *M. Yu. Moshkova*  
Proofreader *M. Yu. Moshkova*

Signed print 25.03.2022.  
Edition 100 copies. **Order number**.

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

© BSU, 2022