

ISSN 2079-3928

Природо- пользование



1

2026

Государственное научное учреждение
«Институт природопользования
Национальной академии наук Беларуси»

Природопользование

2026. № 1

Основан в 1996 г. как сборник научных трудов.
В 2018 г. преобразован в журнал.
Включён в Перечень научных изданий
Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований.
Размещен в библиографической базе данных научного цитирования
«Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).
Выходит 2 раза в год

Главный редактор

Лысенко С. А. – доктор физико-математических наук, профессор

Редакционная коллегия:

Хомич В. С. – доктор географических наук, доцент (*заместитель главного редактора*)
Бровка Г. П. – доктор технических наук, профессор
Грибик Я. Г. – кандидат геолого-минералогических наук, доцент
Жогло В. Г. – доктор геолого-минералогических наук, доцент
Зерницкая В. П. – доктор географических наук, доцент
Какарека С. В. – доктор технических наук, профессор
Камышенко Г. А. – кандидат технических наук, доцент
Кухарчик Т. И. – доктор географических наук, профессор
Логинов В. Ф. – академик, доктор географических наук, профессор
Рылова Т. Б. – доктор геолого-минералогических наук, доцент
Струк М. И. – кандидат географических наук, доцент
Янута Ю. Г. – кандидат технических наук, доцент

Международный редакционный совет:

Балтрунас В. – доктор наук (геология), профессор (Литва)
Зюзин Б. Ф. – доктор технических наук, профессор (Россия)
Клавинс М. – доктор наук (химия), профессор (Латвия)
Маркс Л. – доктор наук (геология), профессор (Польша)
Рыбальский Н. Г. – доктор биологических наук, профессор (Россия)
Тишков А. А. – член-корреспондент РАН, доктор географических наук, профессор (Россия)
Черепанский М. М. – доктор геолого-минералогических наук, профессор (Россия)

Адрес:

Ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь
Тел.: +375 (17) 215-26-32. Факс: +375 (17) 215-24-13
info@nature-nas.by
<https://nature-nas.by/journal>



State Scientific Institution
“Institute of Nature Management
of the National Academy of Sciences of Belarus”

Nature Management

2026. № 1

Was founded in 1996 as a proceeding.
In 2018 was transformed into a journal.
Was included in the List of scientific publications
of the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus
for publishing the results of dissertation research.
Was placed in the bibliographic database of scientific citation
“Russian Science Citation Index” (RSCI).
Periodicity is 2 issues per year

Editor-in-Chief

Sergey Lysenko – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor

Editorial Board:

Valery Khomich – D. Sc. (Geography), Docent (*Associate Editor-in-Chief*)
Gennadiy Brovka – D. Sc. (Technical), Professor
Yaroslav Gribik – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Docent
Vasiliy Zhoglo – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Docent
Valentina Zeritskaya – D. Sc. (Geography), Docent
Sergey Kakareka – D. Sc. (Technical), Professor
Halina Kamysheva – Ph. D. (Technical), Docent
Tamara Kukharchyk – D. Sc. (Geography), Professor
Vladimir Loginov – Academician, D. Sc. (Geography), Professor
Tatyana Rylova – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Docent
Mikhail Struk – Ph. D. (Geography), Docent
Yuri Yanuta – Ph. D. (Technical), Docent

International Editorial Council:

Valentinas Baltrunas – D. Sc. (Geology), Professor (Lithuania)
Boris Zuzin – D. Sc. (Technical), Professor (Russia)
Maris Klavins – Dr. Habil. (Chemistry), Professor (Latvia)
Leshek Marks – Dr. Habil. (Geology), Professor (Poland)
Nikolay Rybalsky – D. Sc. (Biology), Professor (Russia)
Arcadiy Tishkov – Corresponding Member, D. Sc. (Geography) (Russia)
Mikhail Cherepanskii – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor (Russia)

Address:

10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Republic of Belarus
Phone: +375 (17) 215-26-32, Fax: +375 (17) 215-24-13
info@nature-nas.by
<https://nature-nas.by/journal>



СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

Лысенко С. А., Камышенко Г. А. <i>Lysenko S. A., Kamyshenka H. A.</i>	О результатах и тенденциях развития научных исследований в области рационального природопользования в Беларуси <i>On the results and trends of scientific research in the field of rational nature management in Belarus</i>	5
Логинов В. Ф., Микуцкий В. С. <i>Loginov V. F., Mikutsky V. S.</i>	Многолетние изменения типов атмосферной циркуляции по Б. Л. Дзердзеевскому и глобального климата <i>Long-term changes in atmospheric circulation types by B. L. Dzerdzeevskii and global climate system</i>	30
Мельник В. И., Юдыцкая К. С. <i>Melnik V. I., Yudytskaya K. S.</i>	Анализ показателей атмосферного увлажнения для агроклиматического районирования территории Беларуси <i>The analysis of the atmospheric humidification indexes for the agroclimatic zoning of the territory of Belarus</i>	40
Сазонов А. А. <i>Sazonau A. A.</i>	Оценка современного почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов Беларуси <i>Assessment of the modern soil and agroecological potential of agricultural landscapes of Belarus</i>	55
Кислицын Д. А., Небышинец А. М., Клебанович Н. В. <i>Kislitsyn D. A., Nebyshynets A. M., Klebanovich N. V.</i>	Геоинформационная оценка уязвимости почв к водной эрозии на сельскохозяйственных землях Новогрудской возвышенности <i>Geoinformation assessment of soil vulnerability to water erosion on agricultural lands of the Novogrudok upland</i>	71
Гертман Л. Н., Адамович Б. В., Давидович Ю. С., Рудаковский И. А., Макаревич О. А., Верес Ю. К. <i>Hertman L. N., Adamovich B. V., Davidovich Yu. S., Rudakovsky I. A., Makarevich O. A., Veres Yu. K.</i>	Оценка состояния руслового водохранилища Зельвянское с целью его оздоровления и повышения рекреационной привлекательности (Гродненская область, Беларусь) <i>Assessment of a Zelvianskoye riverine reservoir for its restoration and enhancement of recreational value (Grodno region, Belarus)</i>	87
Дубенок С. А., Денищик А. И. <i>Dubianok S. A., Denischik A. I.</i>	Особенности формирования и поступления сточных вод в сети канализации населенных пунктов Беларуси <i>Specific features of wastewater formation and inflow into municipal sewerage systems in Belarus</i>	106
Струк М. И., Живнач С. Г. <i>Struk M. I., Zhivnach S. G.</i>	Оценка планировочной организации пригородных лесов Минской агломерации <i>Assessment of the planning organization of suburban forests of the Minsk agglomeration</i>	120
Круковская О. Ю., Алисиевич С. В. <i>Krukowskaya O. Yu., Alisiyevich S. U.</i>	Биоклиматическая комфортность урбанизированных территорий Беларуси <i>Bioclimatic comfort of urbanized territories in Belarus</i>	132
Кухлевский Е. А., Карпиченко А. А. <i>Kukhlevski E. A., Karpichenka A. A.</i>	ГИС-моделирование потоковых ландшафтно-геохимических систем в урбо-ландшафтах г. Бобруйска <i>GIS modeling of flow landscape and geochemical systems in urban landscapes of Bobruisk</i>	148
Кокош Ю. Г., Кудревич М. А. <i>Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A.</i>	Гидрохимические особенности атмосферных осадков и снежного покрова в г. Минске <i>Hydrochemical peculiarities of atmospheric precipitates and snow cover in Minsk</i>	160
Ратникова О. Н., Пашкевич В. И., Борш А. Т., Макаренко Т. И. <i>Ratnikova O. N., Pashkevich V. I., Borsh A. T., Makarenko T. I.</i>	Гидрологический и гидрогеохимический режим повторно обводненных верховых болот Борисово-Глусского торфяного района (Республика Беларусь) <i>Hydrological and hydrogeochemical regime of re-flooded raised bogs of the Borisov-Gluskoye peat region (Republic of Belarus)</i>	172

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

GEOLOGY. MINERALS

Левашкевич В. Г., Майоров В. В., Анализ и оценка содержания метана в водорастворенных газах контрольных 183
Аусев В. Г., Луговский Н. Н., горизонтов Осиповичского подземного хранилища газа (Республика Беларусь)
Глаз А. С.

*Levashkevich V. G., Mayorov V. V., Analysis and assessment of methane content in water-dissolved gases of control
Ausev V. G., Lugovski N. N., horizons at the Osipovich underground gas storage (Republic of Belarus)
Glaz A. S.*

Якушев А. А., Киндеев А. Л. Трехмерное моделирование строения продуктивной толщи и подсчет запасов 192
ленточных глин месторождения «Гайдуковка» с применением геоинформацион-
ных технологий

*Yakushev A. A., Kindeev A. L. Three-dimensional modeling of the structure of the productive stratum and calculation
of reserves of ribbon clays of the Gaidukovka deposit using geoinformation technologies*

Жогло В. Г. Геомиграционное моделирование потенциального загрязнения подземных вод 204
радионуклидами в междуречье Вилия – Гозовка (Республика Беларусь)

*Zhoglo V. G. Geomigration modeling of potential groundwater contamination by radionuclides in the
Viliya – Gozovka interfluve (Republic of Belarus)*

ГЕОТЕХНОЛОГИИ.

ДОБЫЧА, ПЕРЕРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ

GEOTECHNOLOGY.

EXTRACTION, PROCESSING AND THE USE

OF SOLID FUEL MINERALS

Кунцевич В. Б., Гайдукевич О. М., Пути снижения энергозатрат при добыче сапропеля гидромеханизирован- 222
Макаренко Т. И., Агейчик И. В., ным способом
Кляуззе И. В., Калилец Л. П.,
Серая С. М., Татков А. Ю.

*Kuntsevich V. B., Gaidukevich O. M., Ways to reduce energy consumption in sapropel mining by hydromechanized
Makarenko T. I., Ageychik I. V., method
Klyauzze I. V., Kalilets L. P.,
Seraya S. V., Tatkov A. Yu.*

Царюк Т. Я., Навоша Ю. Ю., Влияние щелочной модификации целлюлозосодержащего сырья на адсорб- 231
Соколова Т. В., Фалюшина И. П., ционные свойства продуктов термолиза
Марзан А. С., Пехтерева В. С.,
Калантаров М. Г.

*Tsaryuk T. Ya., Navosha Yu. Yu., Influence of alkaline modification of cellulose-containing raw materials on the
Sokolova T. V., Falyushina I. P., adsorption properties of thermolysis products
Marzan A. S., Pekhtereva V. S.
Kalantarov M. G.*

Жмакова Н. А., Пиллюк Я. Э., Биопрепарат инсектицидного действия на основе отходов табачного про- 239
Макарова Н. Л., Лукашевич Т. Н. изводства

*Zhmakova N. A., Pilyuk Ya. E., Insecticidal biologics based on tobacco production wastes
Makarova N. L., Lukashevich T. N.*

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

IN THE MEMORY OF A SCIENTIST

ПАМЯТИ АНАТОЛИЯ ВИКТОРОВИЧА КУДЕЛЬСКОГО (16.09.1934–10.01.2026)
IN THE MEMORY OF ANATOLIY VIKTOROVICH KUDELSKIY (16.09.1934–10.01.2026)

248

ПАМЯТИ БОРИСА ВАЛЕНТИНОВИЧА КУРЗО (28.10.1949–11.02.2026)
IN THE MEMORY OF BORIS VALENTINOVICH KURZO (28.10.1949–11.02.2026)

251

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ
GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-5-29>

УДК 001.891(476)

Поступила в редакцию 09.04.2026

Received 09.04.2026

**О РЕЗУЛЬТАТАХ И ТЕНДЕНЦИЯХ РАЗВИТИЯ
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ
РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В БЕЛАРУСИ**

С. А. Лысенко, Г. А. Камышенко

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В 2021–2025 гг. в рамках государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» выполнялись исследования, направленные на получение новых знаний о закономерностях развития окружающей среды Беларуси под влиянием природных и антропогенных факторов, решение проблемных вопросов по сохранению и рациональному использованию природных ресурсов, восстановлению нарушенных естественных экологических систем. В статье кратко представлены общие сведения о программе, охарактеризованы ее направленность и структура. Основное внимание уделено важнейшим показателям результативности выполнения подпрограммы «Природные ресурсы и их рациональное использование», входящей в состав указанной программы. Приведены основные результаты выполненных практико-ориентированных научных исследований с указанием их практического использования и перспектив развития. Показаны тенденции развития региональных фундаментальных исследований в области природопользования и охраны окружающей среды на ближайшую перспективу.

Ключевые слова: проблемы природопользования; трансграничное загрязнение; урбоэкология; экологическая геология и геодинамика; палеогеография; климатология; «зеленая» экономика; реабилитация нарушенных земель; экотехнологии; Беларусь.

Для цитирования. Лысенко С. А., Камышенко Г. А. О результатах и тенденциях развития научных исследований в области рационального природопользования в Беларуси // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 5–29.

**ON THE RESULTS AND TRENDS
OF SCIENTIFIC RESEARCH IN THE FIELD
OF RATIONAL NATURE MANAGEMENT IN BELARUS**

S. A. Lysenko, H. A. Kamyshenka

Institute of Nature Management of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. In 2021–2025 within the framework of the state research program “Natural resources and the environment” research was carried out scientific research aimed at gaining new knowledge about the patterns of environmental development in Belarus under the influence of natural and anthropogenic factors, addressing problematic issues related to the conservation and rational use of resources, and restoring damaged ecological systems. This article briefly outlines the program, its focus, and its structure. The focus is on the most important performance indicators for the “Natural resources and their rational use” subprogram, which is part of the program. The key results of completed practice-oriented scientific research are presented, along with their practical application and development prospects. Trends in the development of regional fundamental research in the field of natural resource management and environmental protection for the near future are highlighted.

Keywords: problems of nature management; transboundary pollution; urban ecology; environmental geology and geodynamics; paleogeography; climatology; “green” economy; rehabilitation of disturbed lands; ecotechnologies; Belarus.

For citation. Lysenko S. A., Kamyshenka H. A. On the results and trends of scientific research in the field of rational nature management in Belarus. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 5–29.

Введение. В 2025 г. завершено выполнение государственных программ научных исследований (далее – ГПНИ), утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 27.07.2020 № 438 «О перечне государственных программ научных исследований на 2021–2025 годы». В перечень, включающий 12 программ по различным научным направлениям, входила ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», в рамках которой в 2021–2025 годах велись фундаментальные и прикладные практико-ориентированные исследования в области природопользования и охраны окружающей среды в соответствии с приоритетным направлением научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы «3. Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование», утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156, а также приоритетным направлением социально-экономического развития страны «Обеспечение экологически безопасной жизнедеятельности населения, улучшение охраны окружающей среды, эффективное использование природных ресурсов», определенном в Программе социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы, утвержденной Указом Президента Республики Беларусь от 29.07.2021 № 292.

Государственными заказчиками ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» выступили такие организации, как Национальная академия наук Беларуси, Министерство образования Республики Беларусь, Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Структурно программа включала четыре подпрограммы: «Природные ресурсы и их рациональное использование», «Биоразнообразие, биоресурсы, экология», «Радиация и биологические системы» и «Белорусские недра». Постановлением Президиума Национальной академии наук Беларуси от 06.08.2020 № 38 первой головной организацией-исполнителем по ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» было утверждено государственное научное учреждение «Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси». В рамках указанной программы в период с 2021 по 2025 г. выполнено 40 заданий, объединяющих 154 научно-исследовательские работы (далее – НИР). В выполнении исследований участвовало 29 организаций различной ведомственной принадлежности, из них 14 организаций НАН Беларуси, 13 учреждений Министерства образования и 2 организации Минприроды.

Более подробно остановимся на итогах выполнения подпрограммы «Природные ресурсы и их рациональное использование», головными организациями-исполнителями которой являлись Институт природопользования НАН Беларуси и Белорусский государственный университет. Научным руководителем программы в целом и указанной подпрограммы был утвержден доктор физико-математических наук, профессор С. А. Лысенко.

Цели подпрограммы – получение новых знаний о закономерностях развития окружающей среды Беларуси под влиянием природных и антропогенных факторов, особенностях формирования, размещения, ресурсообеспеченности и использования природных ресурсов; оценка степени комфортности окружающей среды для населения Республики Беларусь (утверждены постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 27.07.2020 № 438).

Подпрограмма «Природные ресурсы и экологическая безопасность» была сформирована как комплекс тематически объединенных заданий, направленных на углубление фундаментальных знаний о закономерностях развития окружающей среды Беларуси под влиянием природных и антропогенных факторов, особенностях формирования, размещения, ресурсообеспеченности и использования природных ресурсов. В 2021–2025 гг. в рамках подпрограммы выполнено 11 заданий, включающих 36 НИР. В выполнении исследований участвовало 7 организаций НАН Беларуси, 8 учреждений Министерства образования и 2 организации Минприроды. Число исполнителей заданий (НИР) составило 295 человек, из них с ученой степенью – 125, т. е. 42,4 %, что свидетельствует о высокой научной квалификации исследователей, позволившей выполнить исследования на мировом и лучшем отечественном уровне по направлениям, имеющим особую значимость для обеспечения экологической безопасности и устойчивого социально-экономического развития страны.

Количественные показатели результативности подпрограммы за период с 2021 по 2025 г. следующие: установлено 78 закономерностей развития природы и 188 зависимостей; разработано 55 новых методов и 213 макетов (карт и картосхем, баз данных и др.); создан 41 экспериментальный образец, среди которых препараты из торфа с добавлением микроэлементов, образцы торфо-сапропелевых грунтов, экспериментальный образец бура для бурения скважин на осушенной торфяной залежи, экспериментальная установка барабанного грохота для исследования процесса механической классификации и др.; разработано 10 лабораторных технологий (на получение грунтов торфяных питательных, торфосапропелевого мелиоранта из фрезерного торфа и сапропелевой пульпы; на определение оптимального способа вентилирования изолированного помещения для снижения концентрации радона в воздухе; калибровочные модели, предназначенные для анализа показателей качества кормов и кормового сырья, и др.).

Научная новизна разработок подтверждена 11 полученными патентами на изобретение Республики Беларусь. По результатам исследований изданы 1742 научные работы, включая 20 монографий, из них 11 опубликованы за пределами Беларуси, 56 учебных пособий, 25 сборников научных трудов, 7 справочных изданий, 5 препринтов, 1629 научных статей (без учета тезисов докладов), из них 435 – в зарубежных изданиях.

По результатам выполнения НИР в рамках подпрограммы защищены 2 докторские (из них в НАН Беларуси – 1, Министерстве образования – 1), 16 кандидатских (из них в НАН Беларуси – 9, Министерстве образования – 7) и 45 магистерских диссертаций.

Основные результаты выполнения подпрограммы «Природные ресурсы и экологическая безопасность».

Трансграничное загрязнение окружающей среды. Распространение загрязнений в атмосфере вследствие переноса и рассеивания газообразных и аэрозольных примесей от источников выброса (промышленность, транспорт, последствия природных и антропогенных катастроф) требует развития методов мониторинга, выявления пространственной структуры загрязнения атмосферного воздуха. Выполненные исследования трансграничного загрязнения окружающей среды значительно расширили возможности применения моделирования, что позволило оценить вклад в приземные концентрации трансграничного и регионального переноса загрязняющих веществ.

Получены новые данные о трендах атмосферного поступления серы и азота, а также потенциала закисления природной среды на территории г. Минска за 2002–2019 гг. Выявлен нисходящий тренд содержания серы и азота, сочетающийся с восходящим трендом величины pH осадков. Изменение содержания серы и азота в осадках привело к сокращению выпадения серы за 18-летний период в среднем на 31,3 кг/км²/год, окисленного азота – на 15,4, восстановленного азота – на 25,6 кг/км²/год. Установлено, что потенциал закисления природной среды снижался с 2005 по 2012 г. параллельно уменьшению выпадений серы и азота; в последующий период тренд потенциала закисления в основном следует тренду выпадения основных катионов [1]. Впервые показано, что среднегодовые темпы сокращения содержания серы и окисленного азота в атмосферных осадках в г. Минске близки к сокращения содержания этих компонентов в осадках на фоновых станциях в Европе, в то же время темпы сокращения содержания восстановленного азота в осадках существенно более высокие, что интерпретировано как результат преобладания локального и субрегионального поступления аммонийного азота над дальним переносом. Полученные результаты важны для прогноза воздействий атмосферных выпадений на природные системы города, в частности, почвенный и растительный покров, водотоки и водоемы (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Разработан метод пространственно-временной оптимальной интерполяции содержания основных загрязняющих примесей, содержащихся в приземном слое атмосферы в условиях разреженных наблюдений [2].

Созданы алгоритм и программное обеспечение для расчета пространственно-временных распределений индуцированной Солнцем флуоресценции хлорофилла для территории Беларуси по данным спутниковых спектральных измерений отраженного солнечного излучения, что является важной составной частью методики оценивания состояния растительности по данным космических наблюдений. Получены численные оценки межгодовой и сезонной изменчивости среднемесячных значений индуцированной Солнцем флуоресценции хлорофилла и их неопределенностей для различных регионов Беларуси (рис. 1).

Полученные результаты являются новыми и соответствуют мировому уровню; в настоящее время используются при выполнении мероприятия ГП «Экология» на 2026–2030 годы, подпрограмма 4 «Охрана окружающей среды» (*Институт физики НАН Беларуси*).

Выполнен анализ данных об антропогенном загрязнении воздуха и приземном озоне с пунктов мониторинга атмосферного воздуха Белгидромета за 2021–2025 гг. в областных городах и Березинском биосферном заповеднике. Проведена доработка программного комплекса, реализующего вычисление регрессионных коэффициентов модели с учетом предложенных методических изменений, связанных с учетом влияния различных типов антропогенных загрязнителей (включая твердые частицы) на приземные концентрации озона и друг на друга. Внедренные модификации обеспечили соответствие алгоритмов основным современным требованиям анализа данных. Программа успешно прошла этап тестирования, в ходе которого были подтверждены корректность математических расчетов и работоспособность обновленного функционала. Совершенствование методики определения зависимости концентрации приземного озона от метеоусловий и прекурсоров направлено на более полное использование климатологии приземного озона с целью выработки эффективных методов прогноза его концентрации в условиях меняющихся климата и уровня антропогенного загрязнения воздуха (*НИИЦ МО БГУ*).

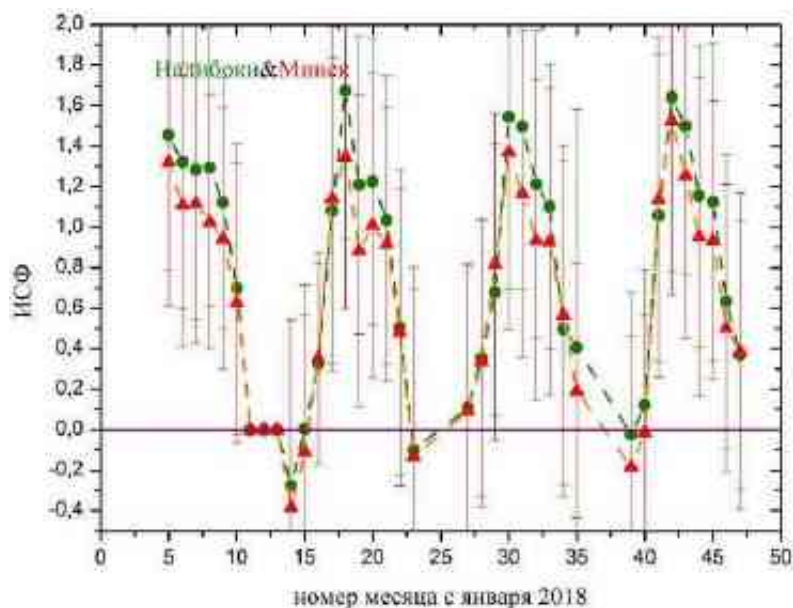


Рис. 1. Среднемесячные значения индуцированной Солнцем флуоресценции хлорофилла и их неопределенности, восстановленные по данным спутников OCO-2 и Sentinel-5P для г. Минска и Налибокской пущи

(авторы: канд. физ.-мат. наук А. И. Бриль, канд. физ.-мат. наук Н. С. Метельская, канд. физ.-мат. наук А. П. Чайковский)

Fig. 1. Monthly mean values of solar-induced chlorophyll fluorescence and their uncertainties, reconstructed from OCO-2 and Sentinel-5P satellite data for Minsk and Nalibokskaya Pushcha

(authors: Ph. D. (Phys.-Math.) A. I. Bril, Ph. D. (Phys.-Math.) N. S. Metelskaya, Ph. D. (Phys.-Math.) A. P. Tchaikovsky)

Урбоэкологические исследования. Важной задачей устойчивого развития государства является сохранение качества среды проживания человека, которое напрямую связано с загрязнением атмосферного воздуха, вод, почв и растительности на урбанизированных территориях. В рамках подпрограммы развита методология комплексного геоэкологического исследования урбанизированных территорий с целью обоснования оптимальной организации расположенных в их пределах природных и природно-техногенных комплексов.

Определены особенности изменения пригородного природопользования на современной агломерационной стадии развития г. Минска. Выявлена тенденция к повышению его интенсивности на непосредственно прилегающей к городу территории в связи с ростом численности населения и объема производства в ее пределах. Определены ожидаемые направления изменения пригородного природопользования на средне- и долгосрочную перспективу в связи с планируемым развитием городов-спутников. Они предполагают расширение площади территории, где будет происходить рост плотности населения и производственных мощностей, что приведет к дальнейшему увеличению использования местных природных ресурсов и распространения техногенных объектов, усилению нагрузок на окружающую среду, дроблению естественных экосистем. В этих условиях для обеспечения экологических интересов формируемой городской агломерации повышается необходимость разработки специальной целевой схемы эколого-хозяйственного зонирования единой для нее пригородной территории [3]. Результаты использованы при внесении изменений и дополнений в генеральный план г. Минска до 2030 и 2050 г., при разработке проектов детальной планировки, геоэкологических изысканиях и обоснованиях объектов нового строительства (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Разработано методическое обоснование оценки геоэкологического потенциала природных комплексов в малых городах, базирующееся на совместном учете факторов его формирования – естественной устойчивости природных комплексов, степени их сохранности и антропогенных воздействий. Впервые проведена оценка геоэкологического потенциала природных комплексов для всех 76 малых городов Беларуси. Выявлена зависимость величины потенциала от природно-ландшафтных условий размещения городов. Выполнены частные оценки по факторам формирования (оценка природной устойчивости и антропогенного воздействия), а также интегральная – по величине геоэкологического потенциала (рис. 2). Определены показатели интенсивности техногенных нагрузок и вклада мобильных и стационарных источников выбросов загрязняющих веществ, что позволило определить адресные меры по их снижению [4] (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

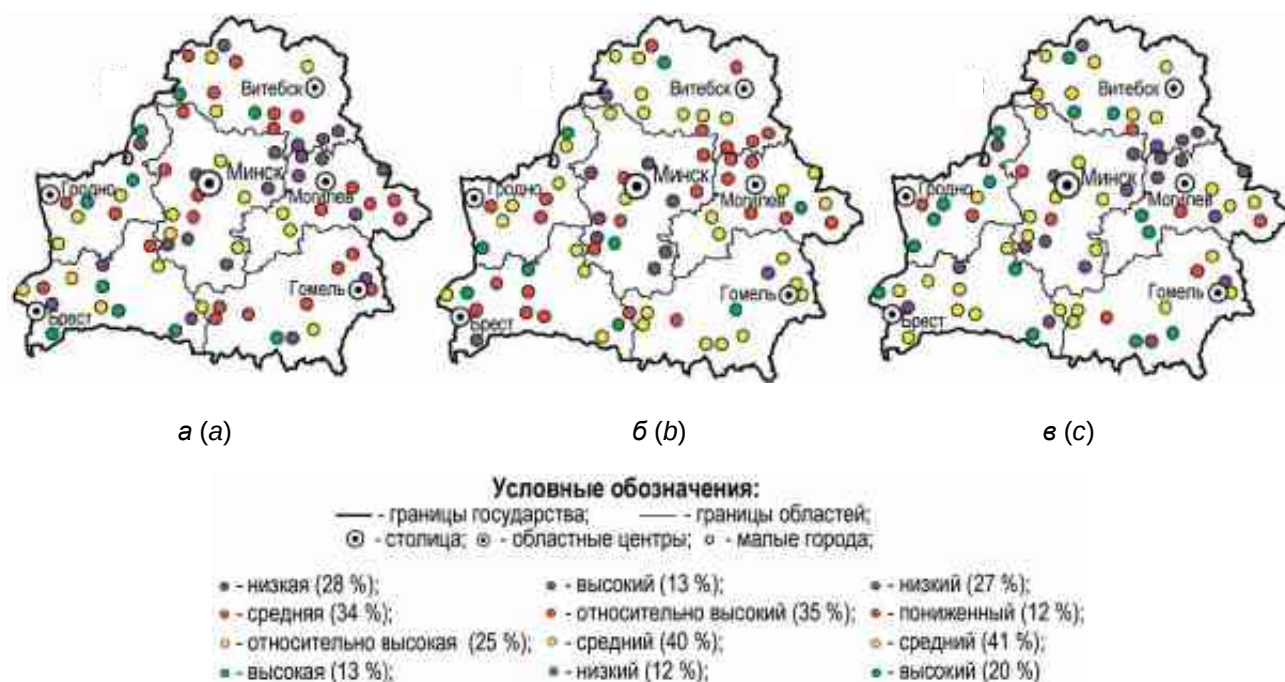


Рис. 2. Оценка степени устойчивости (а), уровня антропогенного воздействия (б) и геоэкологического потенциала (в) малых городов Беларуси
(автор: канд. геогр. наук Ю. А. Романкевич)

Fig. 2. Assessment of the degree of resilience (a), the level of anthropogenic impact (b) and the geo-ecological potential (c) of small towns in Belarus
(author: Ph. D. (Geogr.) Yu. A. Romankevich)

По разработанной исполнителями из Белорусского государственного университета методике составлены карты уровня средоформирующих функций зеленых насаждений урболандшафтов таких городов, как Гродно, Барановичи, Пинск, Орша, Бобруйск, Молодечно [5], учитывающие величину депонирования диоксида углерода (рис. 3) и степень снижения теплового загрязнения зелеными насаждениями.



Рис. 3. Оценка уровня (а – значительный; б – существенный; с – средний; d – низкий; e – минимальный) средоформирующих функций урболандшафтов (I–VI) городов Орши, Пинска, Молодечно
(авторы: канд. геогр. наук И. И. Счастлиная, канд. геогр. наук Д. С. Воробьев)

Fig. 3. Assessment of the level (a – significant; b – substantial; c – average; d – low; e – minimal) of environment-forming functions of urban landscapes (I–VI) in Orsha, Pinsk and Molodechno
(authors: Ph. D. (Geogr.) I. I. Shchasnaya, Ph. D. (Geogr.) D. S. Varabyou)

Для исследованных городов выполнен сравнительный анализ экологических (эколого-геохимических) рисков, которые зависят от особенностей формирования и специфики развития городских ландшафтов. В результате анализа пространственного распределения показателя суммарного химического загрязнения почв урболов ландшафтов городов Гродно, Барановичей, Пинска, Орши, Бобруйска выявлены четыре степени эколого-геохимических рисков – от минимальных до высоких; в г. Молодечно обнаружены три степени – от минимальных до средних [6]. Результаты исследований направлены на оптимизацию городской среды и перспективны для использования проектными организациями при разработке Генеральных планов и Схем озелененных территорий городов; использованы в практике градостроительного планирования УП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь и учебном процессе БГУ, что подтверждено актами о внедрении (БГУ).

Выполнена оценка состояния городов Республики Беларусь в сопоставлении с градостроительной моделью «зелёный город», что позволило выявить и обосновать ключевые структурные проблемы развития городских территорий. Разработаны структурно-функциональные и архитектурно-пространственные модели устойчивых городов для условий Республики Беларусь, которые апробированы в ходе партисипаторного проектирования и экспертных консультаций. Результаты вошли в научно-аналитический доклад «Эколого-ориентированное пространственное планирование («зеленое» градостроительство)», подготовленный для разработчиков региональных стратегий устойчивого развития Брестской, Витебской, Гомельской, Гродненской, Минской областей в рамках совместного проекта НИЭИ Минэкономики Республики Беларусь и ПРООН Беларусь. Сформирован комплекс градостроительных методов, основанный на систематизации лучших практик экологически ориентированного градостроительства, приоритизации эколого-ориентированного развития, типологического и пространственного анализа городских населенных пунктов с применением геоинформационных технологий и др. [7]. Предложенный комплекс методов обеспечивает возможность последовательной экологической модернизации городских территорий и ориентирован на согласование информационной базы, стратегического планирования, проектных решений и мониторинга в системе управления развитием городов (БНТУ).

Впервые проведено исследование биологической активности почв урбанизированных территорий в условиях юго-западной части Беларуси. Выявлены особенности показателей целлюлозолитической способности, интенсивности дыхания и каталазной активности почв, различающихся по характеру и интенсивности техногенных воздействий. Дана оценка фитотоксичности почв, относящихся к придорожным, рекреационным, жилым, промышленным территориям, а также расположенных в зоне влияния железнодорожной инфраструктуры. Проведен анализ эффективности использования биологически активных веществ различной природы, а также биопрепаратов различной дозировки и способов их применения для преодоления фитотоксического эффекта и регулирования показателей биологической активности почв в условиях техногенного загрязнения. Выявлены наиболее эффективные препараты и предложены варианты их использования для повышения биологической активности и снижения фитотоксичности почв урбанизированных территорий. Результаты исследований могут стать основой для проведения мониторинга почв урбанизированных территорий, подверженных различным техногенным воздействиям, а также перспективны при разработке новых и усовершенствовании существующих препаратов биологически активных веществ, используемых в сельском хозяйстве и биотехнологии в качестве регуляторов роста и для снижения токсического действия техногенных факторов в отношении микроорганизмов и растений [8] (БрГУ).

Проблемы обращения с отходами производства. Создание благоприятных условий для проживания населения невозможно без решения проблем воздействия на окружающую среду промышленных предприятий, очистных сооружений и полигонов хранения (захоронения) отходов, депонирования осадков сточных вод (далее – ОСВ) и др. В данном направлении выполнен ряд исследований и получены важные для науки и практики результаты.

Выполнены геоэкологические исследования влияния городских очистных сооружений на природные воды и почвы. На примере очистных сооружений городов Брестской области рассмотрены природные предпосылки и техногенные факторы формирования геоэкологических ситуаций в зонах воздействия городских очистных сооружений. С использованием различных эколого-геохимических показателей дана оценка влияния очистных сооружений на состояние почв, поверхностных и подземных вод. Предложены рекомендации по снижению негативных последствий в связи с функционированием городских очистных сооружений [9].

Исследованы системы очистки сточных вод ряда производственных предприятий, среди которых предприятия пищевой отрасли (ОАО «Савушкин продукт», ОАО «Молочный мир», ОАО «Пружанский

молочный комбинат», «Несвижский завод детского питания» ООО, СП «Санта Бремор», ОАО «Жабинковский сахарный завод», ОАО «Верхнедвинский маслосырзавод»), промышленности строительных материалов (РУПП «Гранит»), переработки отходов (КПУП «Брестский мусороперерабатывающий завод»). Выполнен анализ эффективности удаления загрязняющих веществ с учетом процессов образования и накопления осадков сточных вод в производственных отходах с целью разработки способов их дальнейшего экологически приемлемого использования. Установлено, что на пищевых предприятиях повсеместно внедрена флотационная очистка сточных вод, требующая применения коагулянтов и флокулянтов, которая обуславливает образование больших объемов флотошламов, характеризующихся высоким содержанием жиров. Биологическая очистка производственных сточных вод перерабатывающих предприятий представлена аэротенками со вторичными отстойниками или более прогрессивными SBR-реакторами, за исключением Щучинского филиала ОАО «Молочный мир», где в качестве альтернативы вторичным отстойникам также применяется флотационная система [10] (*Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси*).

Разработана система критериев технологического планирования при выборе технологии утилизации или использования ОСВ, обеспечивающая эффективное и экологически безопасное решение проблемы обращения с данным типом отходов. Установлено, что при выборе технологии утилизации и использования ОСВ необходимо учитывать экономические, экологические, технические и социальные критерии. Экономические критерии включают капитальные затраты на оборудование, эксплуатационные расходы, затраты на утилизацию побочных продуктов, возможность получения ценных продуктов и доступность технологических материалов на рынке. Экологические критерии – возможность соблюдения экологических стандартов и нормативов, минимизацию степени воздействия на окружающую среду, степень образования вторичных отходов и степень потребления энергии и воды. Технические критерии – возможную пропускную способность, автоматизацию и управление для снижения зависимости от человеческого фактора. Социальные критерии касаются безопасности и здоровья работников, а также безопасности и здоровья населения при использовании продуктов переработки ОСВ. Полученные критерии и их весовые коэффициенты позволяют выделить ключевые факторы выбора оптимальной технологии и оптимизировать выбор технологии переработки ОСВ в зависимости от их состава, обеспечивая эффективное и безопасное обращение с отходами (*Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси*).

Показана эффективность способа утилизации полимерсодержащих отходов и нефтешламов путем пиролиза их композиций с торфом с получением калорийного пиролизного газа, смолы и твердого коксозольного остатка. Установлено, что при пиролизе торфополимерных композиций в присутствии катализаторов (соли кобальта, марганца, железа) в стационарном слое происходит увеличение глубины конверсии органического вещества, выражающееся в снижении баланса содержания коксозольного остатка до 25 % органического материала. Предложенный способ пиролиза торфополимерных композиций направлен на устранение из окружающей среды полимерных отходов, которые в естественной среде обитания разлагаются десятки и сотни лет. Продуктами пиролиза являются жидкие (смола) и газообразные энергоносители, которые могут быть использованы в качестве энергоисточника при проведении указанного процесса. Образующийся коксозольный остаток может рассматриваться, наряду с использованием в строительной области, также и в качестве сорбционного материала для извлечения из природных сред поллютантов-загрязнителей [11] (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Экологическая геология и геодинамика. Исследована степень комфортности геологической среды для жизнедеятельности населения путем выполнения комплексной оценки геоэкологических рисков на территории Беларуси, связанных с динамикой ландшафтов, влиянием экологически опасных объектов на качество подземных вод, функционированием долинных комплексов рек и радоноопасностью жилых и производственных помещений.

Выявлены особенности проявления современных геологических процессов на территории Центральной Беларуси, определены факторы, влияющие на условия жизнедеятельности населения, а также разработаны критерии определения неблагоприятных последствий проявления современной геодинамики, которые являются научной основой для оценки степени экологической безопасности и комфортности природной среды для жизнедеятельности населения. Разработана схема районирования территории Центральной Беларуси по степени комфортности геологической среды для жизнедеятельности населения масштаба 1 : 500 000 (рис. 4), перспективная для использования при планировании и реализации крупных инженерно-строительных работ, разработке и осуществлении проектов рациональной организации территорий, природоохранных мероприятий, а также мероприятий по снижению неблагоприятных последствий проживания населения в зонах повышенной геодинамической активности [12] (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

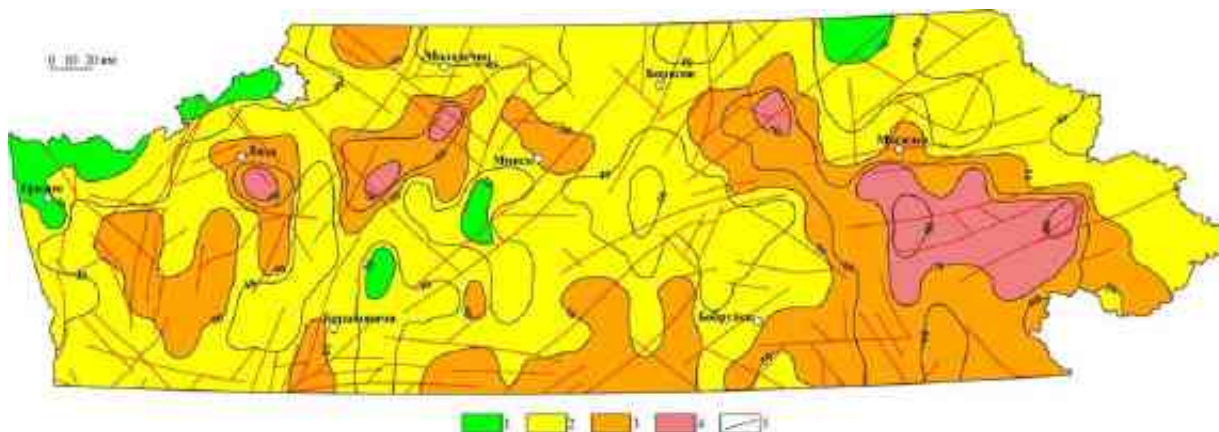


Рис. 4. Схема районирования территории Центральной Беларуси по степени комфортности (1 – комфортная; 2 – умеренно комфортная; 3 – пониженная комфортность; 4 – некомфортная; 5 – некомфортная в зонах активных разломов) геологической среды для жизнедеятельности населения (масштаб 1 : 500 000)
(авторы: акад. А. В. Матвеев, канд. геол.-минерал. наук Е. А. Кухарик)

Fig. 4. Scheme of zoning the territory of Central Belarus by the degree of comfort (1 – comfortable; 2 – moderately comfortable; 3 – reduced comfort; 4 – uncomfortable; 5 – uncomfortable in the zones of active faults) geological environment for the population's life activity (scale 1 : 500,000)
(authors: Academician A. V. Matveyev, Ph. D. (Geol.-Mineral.) E. A. Kukharik)

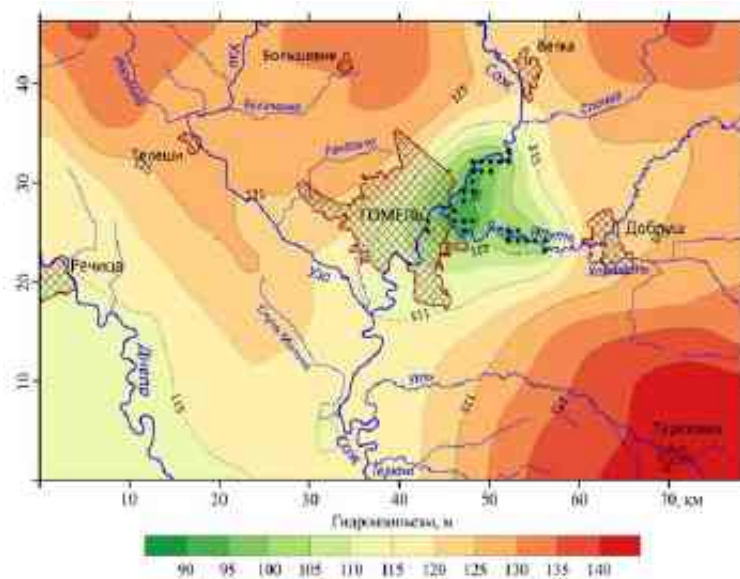
Разработано научное обоснование информационно-компьютерной системы управления состоянием подземных вод в зонах влияния экологоопасных объектов на территории Беларуси. Созданы численные геофильтрационные и геомиграционные модели зон активного и замедленного водообмена для территорий: района влияния I–IV рудоуправлений ОАО «Беларуськалий», участка размещения хвостового хозяйства Петриковского горно-обогатительного комплекса, района расположения ОАО «Гомельский химический завод» и др. Созданные модели воспроизводят водоносные горизонты и комплексы четвертичных, палеогеновых, меловых, юрских отложений зоны активного водообмена, а также надсолевые отложения зоны замедленного водообмена, что позволяет оценивать водозащитные свойства надсолевой толщи над горными выработками. По результатам моделирования составлены прогнозные карты загрязнения подземных вод (рис. 5).

Данные карты являются перспективными для принятия управленческих решений по недопущению ухудшения качества питьевой воды и планированию мероприятий по условиям хранения промышленных и коммунальных отходов. Полученные результаты использованы ОАО «Беларуськалий» и ОАО «Белгорхимпром» при разработке проектно-сметной документации по созданию системы локального мониторинга подземных вод в зоне влияния объектов хвостового хозяйства Петриковского горно-обогатительного комплекса, а также ГП «НПЦ по геологии» – при апробации и утверждении эксплуатационных запасов пресных подземных вод на водозаборах г. Гомеля в Республиканской комиссии по запасам полезных ископаемых Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь.

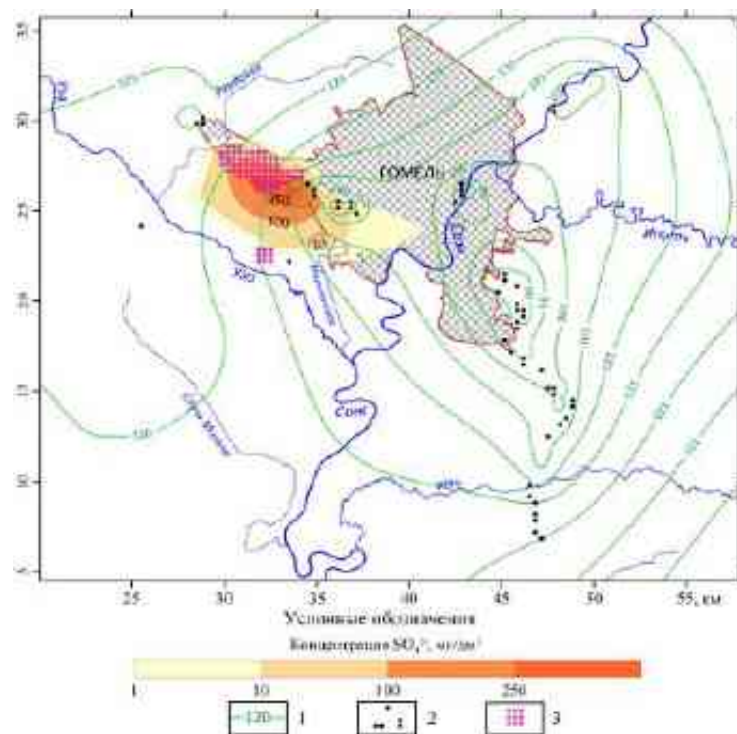
Предложен новый методический подход количественной оценки инфильтрационного водообмена и естественных ресурсов подземных вод слабодренированных речных бассейнов [13] (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Разработана общая система геохимических индикаторов для оценки экологических рисков функционирования долинных комплексов рек, дренирующих территории с различной техногенной нагрузкой: а) донные отложения, воды; б) почвы; в) растительность. Информативными геохимическими индикаторами при опробовании донных отложений на территории Беларуси являются показатели содержания металлов в органическом веществе наилок (субфациальное образование) и нормированные по железу данные содержания металлов в минеральной части современного аллювия; для вод: содержание, коэффициент водной миграции, различные варианты оценки ионного стока, pH, Eh и др. На фоновых территориях содержание растворенных металлов в речных водах определяется преобладающим типом гидрохимической провинции, тогда как взвешенных – степенью выраженности агротехногенеза. Информативными геохимическими индикаторами при опробовании пойменных почв, кроме традиционных показателей ландшафтной геохимии, являются данные содержания химических элементов в органическом веществе верхних горизонтов (фульво-, гуминовые кислоты и др.); для растительности: биофильность; коэффициент биологического поглощения; биогеохимическая активность вида; ряд

биологического поглощения; растительно-водный коэффициент (корневой, надземный); растительно-газовый коэффициент (корневой, надземный); относительное содержание вида растения (коэффициент относительного поглощения); относительное содержание органа растения (акропетальный коэффициент); относительное содержание элементов в растении по фазам развития.



а (a)



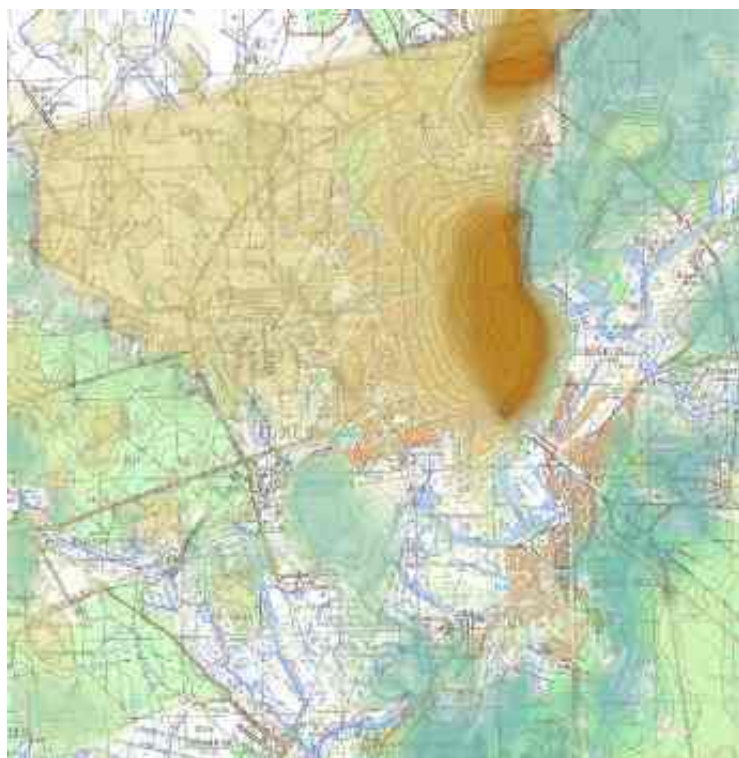
б (b)

Рис. 5. Прогнозные карты территории г. Гомеля: а – гидроизопьез турон-маастрихтского водоносного горизонта при проектной производительности водозаборов ($Q_{\text{сум}} = 248\,248 \text{ м}^3/\text{сут}$); б – загрязнения сульфатами подземных вод аптского-нижнесеноманского водоносного горизонта на прогнозный период 100 лет (автор: д-р геол.-минерал. наук В. Г. Жогло)

Fig. 5. Forecast maps of the territory of Gomel: a – hydroisopyez of the Turonian-Maastrichtian aquifer at the design capacity of water intakes ($Q_{\text{sum}} = 248,248 \text{ m}^3/\text{day}$); b – contamination of groundwater by sulfates of the Aptian-Lower Cenomanian aquifer for a forecast period of 100 years (author: D. Sc. (Geol.-Mineral.) V. G. Zhoglo)

Растениями-накопителями в естественных (фоновых) и техногенных обстановках при прочих равных условиях являются: Ti – роголистник, частуха подорожниковая, рдест; V – роголистник; Cr, Fe и Zr – роголистник, частуха подорожниковая, стрелолист; Mn – роголистник, рогоз; Co – роголистник; Ni – роголистник, рдест, частуха подорожниковая; Cu – частуха подорожниковая, сусак зонтичный; Sr – роголистник, рдест, водный орех, сусак зонтичный; Ba – роголистник, рдест; Pb – роголистник, рдест, стрелолист, сусак зонтичный. Таким образом, при изучении уровня техногенного загрязнения водоемов на основе высшей водной растительности в первую очередь необходимо учитывать видовой состав опробуемого материала, в котором могут быть представлены растения-концентраторы (например, роголистник, рдест и др.). Полученные результаты могут быть использованы для организации мониторинговых исследований миграции отдельных химических элементов в донных отложениях, водах, почвах и растительности [14] (БГУ).

При реализации комплексного подхода к изучению физических свойств и вещественного состава распространенных грунтов на территории Гомельской городской агломерации получены новые данные о поступлении радона в среду обитания человека [15]. Выделены территориальные ландшафтно-геологические кластеры, различающиеся степенью радоноопасности, построена карта потенциальной радоноопасности исследуемой территории (рис. 6).



Обозначение	ОАР в грунтах, кБк/м³	Оценка радоноопасности грунтов
	<5	Не опасные
	5–10	Не опасные
	10–15	Не опасные
	15–25	Потенциально радоноопасные
	>25	Потенциально радоноопасные

Рис. 6. Карта радоноопасности территории Гомельской городской агломерации
(автор: канд. геол.-минерал. наук М. И. Автушко)

Fig. 6. Radon hazard map of the Gomel urban agglomeration
(author: Ph. D. (Geol.-Mineral.) M. I. Awtushka)

Результаты позволяют планировать характер использования территорий под промышленное строительство или жилищную застройку, а в пределах существующего жилого фонда – выявлять помещения с аномально высокими концентрациями радона в воздухе. Разработаны и переданы средства массовой информации материалы по радону для информирования специалистов и населения о радиационной опасности радона, концентрациях в воздухе и воде, о дозах облучения человека и мероприятиях по защите и снижению радонообусловленного риска (*Институт радиобиологии НАН Беларуси*).

Палеогеографические исследования. Исследования в области палеогеографии имеют важное значение для восстановления истории формирования рельефа, ландшафтов и климата, прогнозирования природных изменений.

На основании анализа особенностей строения рельефа земной поверхности и палинологических данных выполнены реконструкции и построены схемы палеоландшафтов оптимума муравинского межледниковья и оптимальной фазы голоцена масштаба 1 : 500 000 территории Центральной Беларуси. Выявлена и охарактеризована направленность изменений природной обстановки на территории изученного региона в позднем плейстоцене и голоцене под воздействием климатических изменений, хозяйственной деятельности человека, современных геологических процессов, что может служить основой для выявления возможного дальнейшего естественного процесса развития природных комплексов в Центральной Беларуси [16].

В результате комплексных исследований выполнена детальная реконструкция ландшафтно-климатических изменений, проходивших на территории Беларуси в течение позднеледниковья и голоцена. Обоснована хроностратиграфическая схема расчленения отложений и прослежены этапы послеледниковой эволюции осадконакопления. Детально изучены этапы деградации последнего ледникового покрова и изменения растительности на фоне глобальных климатических трендов к потеплению или похолоданию. Определены пути миграции основных лесообразующих пород и их роль на отдельных этапах позднеледниковья и голоцена, построены пыльцевые карты для различных временных срезов [17] (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Климатические исследования. В рамках подпрограммы выполнена оценка современных и будущих тенденций изменений климатических характеристик на территории Беларуси в контексте их влияния на природные ресурсы и погодозависимые отрасли экономики [18]. В выполнении климатических исследований участвовали исполнители из организаций НАН Беларуси, Министерства образования и Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь.

Разработан оперативный метод среднесрочного прогноза приземных метеозлементов на территории Беларуси на основе ансамбля глобальных и региональных гидродинамических моделей и методов машинного обучения. Установлено, что для заблаговременности 12 ч и выше ансамблевый метод по всем показателям успешности метеорологического прогноза превосходит индивидуальные модели ансамбля. Прогнозы приземной температуры воздуха ансамблевым методом в пределах 5 и 7 сут. имеют такую же среднюю оправдываемость, как прогнозы лучшей из моделей ансамбля (системы AIFS Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды на основе глубокого машинного обучения) в пределах 3 и 5 сут. соответственно (рис. 7). Точность ансамблевых прогнозов относительной влажности воздуха, скорости и направления ветра, давления на уровне моря и общей облачности для заблаговременности в пределах 7 сут. также стабильно превышает точность прогнозов индивидуальных моделей [19]. Результаты НИР направлены на повышение качества среднесрочного прогноза приземных метеозлементов на территории Беларуси, в настоящее время используются при выполнении задания ГНТП «Инновационные технологии устойчивого использования природных ресурсов и охрана окружающей среды» в интересах Минприроды (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

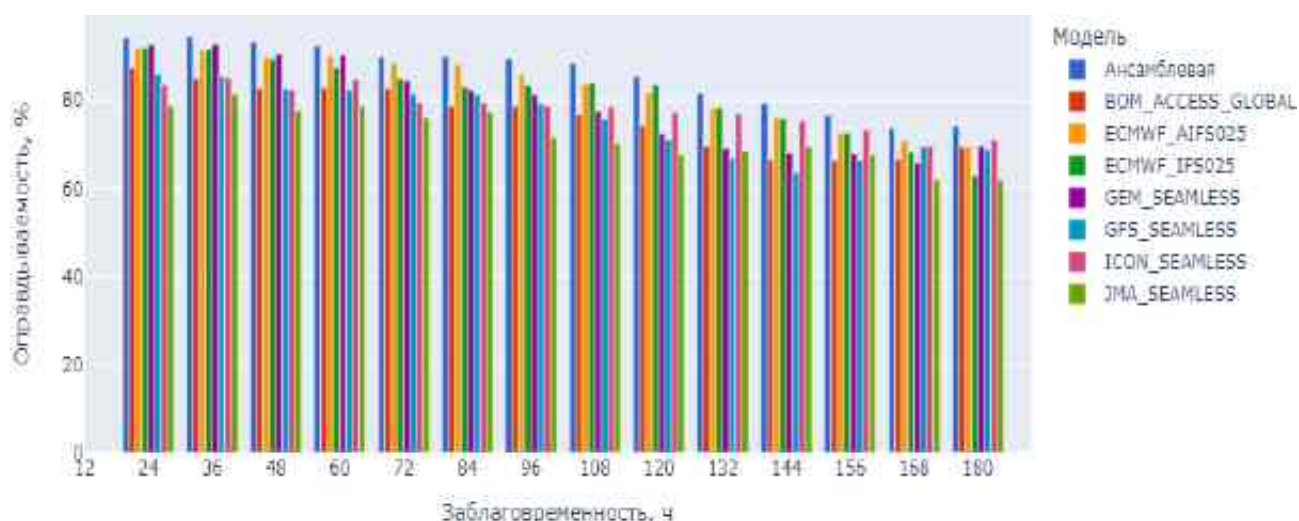


Рис. 7. Оправдываемость прогноза температуры воздуха для ансамбля моделей и отдельных глобальных и региональных гидродинамических моделей
(автор: д-р физ.-мат. наук С. А. Лысенко)

Fig. 7. Accuracy of air temperature forecast for an ensemble of models and individual global and regional hydrodynamic models
(author: D. Sc. (Phys.-Math.) S. A. Lysenko)

Выполнены работы по выявлению влияния региональных особенностей изменения климата на устойчивость биогеоценозов Беларуси. Впервые получены данные о характере реакции лесных насаждений на осушительную мелиорацию на фоне изменения климата и особенностях климатически детерминированного прироста отдельных перспективных интродуцированных лесных пород. Разработано районирование территории Беларуси по характеру реакции хвойных пород на изменение климата (рис. 8), а также получена оценка сдвига границ зон оптимума для выращивания лесных древесных пород, что является основой для разработки региональных составов лесных насаждений и лесных культур с повышенной устойчивостью к прогнозируемому изменению климата [20]. Результаты важны для обеспечения экологически безопасного, высокоэффективного природопользования (Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси).

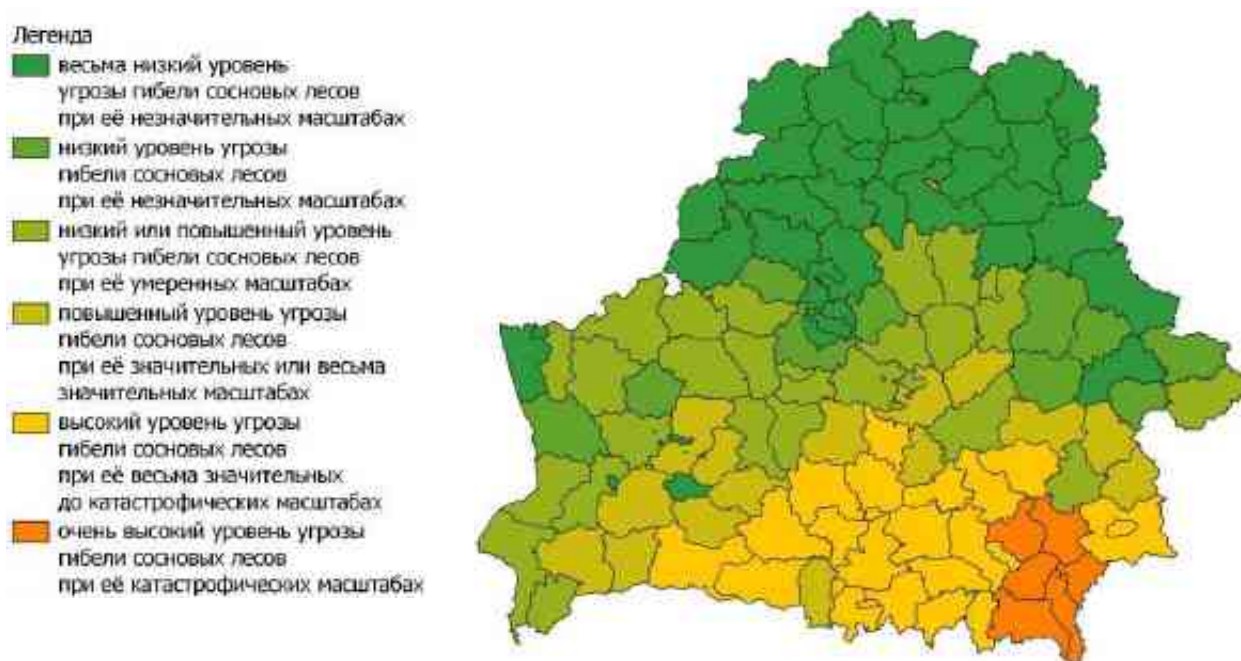


Рис. 8. Районирование территории Беларуси по характеру реакции сосновых лесов на изменение климата
(авторы: канд. биол. наук А. В. Пугачевский, Я. К. Игнатьев, А. В. Мандрык)

Fig. 8. Zoning of the territory of Belarus based on the nature of the response of pine forests to climate change
(authors: Ph. D. (Biol.) A. V. Pugachevsky, Ya. K. Ignatiev, A. V. Mandryk)

Выявлены ключевые закономерности пространственного распределения и деградации сосновых биогеоценозов Белорусского Полесья в зависимости от глубины залегания грунтовых вод, сформированной исторической мелиорацией. Установлено, что наиболее критическим является диапазон глубины залегания грунтовых вод 2,1–5,0 м, где сосредоточены основные массивы сосняков и наблюдается максимальный экологический риск. В зоне глубины залегания грунтовых вод 3,1–5,0 м фиксируется массовое усыхание с падением текущего прироста более чем на 25 %, снижением бонитета до IV–V классов и долей ослабленных деревьев свыше 35 %. Результаты позволили провести пространственно-дифференцированное зонирование территории по степени экологического риска, что служит основой для адресного планирования лесохозяйственных и водорегулирующих мероприятий [21] (БГУ).

Определена изменчивость радиального прироста деревьев сосны обыкновенной и ели европейской различного географического происхождения, отражающая отклик исследуемых насаждений по приросту деревьев по диаметру на изменения погодно-климатических условий, позволяющая сделать отбор перспективных происхождений для дальнейших целей селекции. Выявлена составляющая доля генотипической компоненты в общей изменчивости величины их радиального прироста. Установлен качественный и количественный химический состав экстрактивных веществ деревьев сосны обыкновенной и ели европейской разного географического происхождения, определены физико-механические свойства их древесины. Установлено географическое подразделение ценопопуляций исследуемых хвойных культур и проведен отбор перспективных климатических экотипов на увеличение радиального прироста и устойчивости с последующим выделением кандидатов в сорта-популяции.

Результаты будут использованы в семеноводстве лесных растений государственными лесохозяйственными учреждениями Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь, учреждением «Республиканский лесной селекционно-семеноводческий центр», в учебно-опытных лесхозах Министерства образования Республики Беларусь (БГТУ).

В связи с изменением агроклиматических условий произрастания основных сельскохозяйственных культур выполнено новое агроклиматическое районирование территории Беларуси с выделением границ агроклиматических областей (подобластей), районов за наиболее теплые десятилетия 2000–2022 гг. Проведено разделение территории Беларуси на западную и восточную части (подобласти) по годовой амплитуде температур воздуха самого теплого (июль) и самого холодного (январь) месяцев как следствия континентальности климата (рис. 9) [22]. С использованием современных климатических моделей составлен прогноз изменения основных агроклиматических показателей к 2035 г. (суммы температур воздуха выше 10 °С, осадки за год и теплый период, показатели увлажнения, суммы отрицательных температур). По результатам прогноза выделены новые границы агроклиматических областей и даны оценки условий произрастания основных сельскохозяйственных культур в пределах выделенных границ на период до 2035 г. при различных сценариях изменения климата. Полученные оценки в связи с ростом теплообеспеченности территории перспективны для использования в сельскохозяйственном производстве при планировании мероприятий по возделыванию традиционных культур, а также по расширению ассортимента новых сортов и видов культур (Институт природопользования НАН Беларуси).

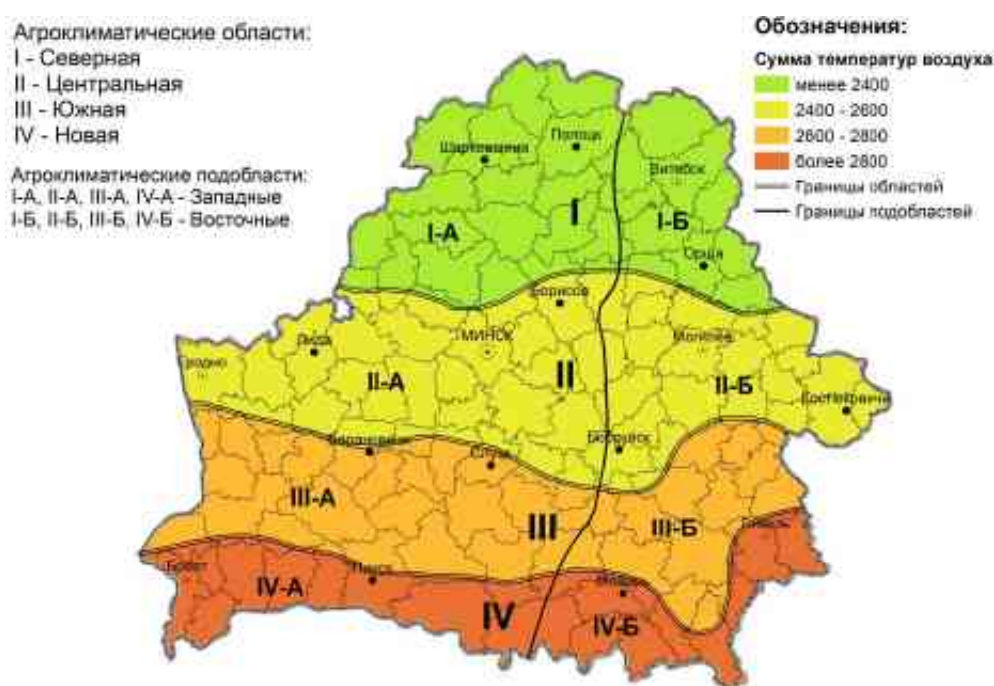


Рис. 9. Районирование территории Беларуси по суммам температур выше 10 °С, 2000–2022 гг.
(авторы: канд. геогр. наук В. И. Мельник, д-р физ.-мат. наук С. А. Лысенко, канд. геогр. наук Ю. А. Бровка, канд. геогр. наук М. А. Хитриков, И. В. Буяков)

Fig. 9. Zoning of the territory of Belarus based on the sum of temperatures above 10 °C, 2000–2022
(authors: Ph. D. (Geogr.) V. I. Melnik, D. Sc. (Phys.-Math.) S. A. Lysenko, Ph. D. (Geogr.) Yu. A. Brovka, Ph. D. (Geogr.) M. A. Khitykau, I. V. Buyakov)

Исследованы гидролого-климатические режимы территории Беларуси в современных условиях. Определены взаимосвязи изменений поверхностных и подземных вод на территориях Беларуси, наиболее подверженных негативному влиянию изменения климата, в частности, в бассейнах рек Днепр, Припять, Западный Буг, Западная Двина, Неман на участках интенсивного отбора подземных вод. Установлены закономерности природной взаимосвязи условий формирования многолетнего и сезонного режимов речного стока и гидродинамического режима подземных вод, а также закономерность многолетних и сезонных колебаний уровней грунтовых и напорных вод на участках интенсивного отбора подземных вод, обусловленные техногенными факторами. Разработаны прогноз водопользования и прогноз наличия водных ресурсов в бассейнах исследованных рек для обеспечения устойчивого

водопользования. Из результатов прогноза следует, что в период до 2035 г. не ожидается значительного увеличения объемов добычи (изъятия), использования воды и сброса сточных вод. Анализ водохозяйственных балансов, проведенный с учетом оценки доли изъятия речного стока от его объема, свидетельствует о том, что с учетом тенденций водопользования и изменения стока в связи с изменением климата водопользование незначительно влияет на режим стока в бассейнах рек Днепр, Припять, Западный Буг, Западная Двина, Неман (РУП «ЦНИИКИВР» Минприроды).

Выполнен анализ опасных гидрологических явлений на территории Беларуси за период 2003–2022 гг., показавший, что наиболее частыми являются опасные явления, сопровождающиеся низкими уровнями воды. Получены средние показатели понижения уровня воды ниже опасного и продолжительности стояния опасных низких уровней воды по гидрологическим постам, на которых наблюдались опасные гидрологические явления. Анализ многолетней динамики речного стока по отдельным месяцам летне-осенней и зимней межени показал, что для водного режима рек Беларуси характерны определенные трансформации, в первую очередь проявляющиеся в увеличении стока зимних месяцев, наиболее выраженные после 1988 г., и относительно постоянстве величины стока в феврале и марте в период с 2000 до 2020 г. Минимальные средние месячные расходы в летне-осенний период чаще всего наблюдаются в августе или сентябре. Получено пространственное распределение максимального и минимального стоков 95 % обеспеченности за многолетний период по территории Беларуси. Разработан макет атласа опасных гидрометеорологических явлений для территории Беларуси. Полученные результаты перспективны для использования при расчете интегральной оценки опасности гидрологических явлений и определения первоочередных мер, направленных на обеспечение безопасности населения, хозяйственных объектов, объектов инфраструктуры и водных экосистем в бассейнах рек (рис. 10) [23, 24] (БрГТУ).

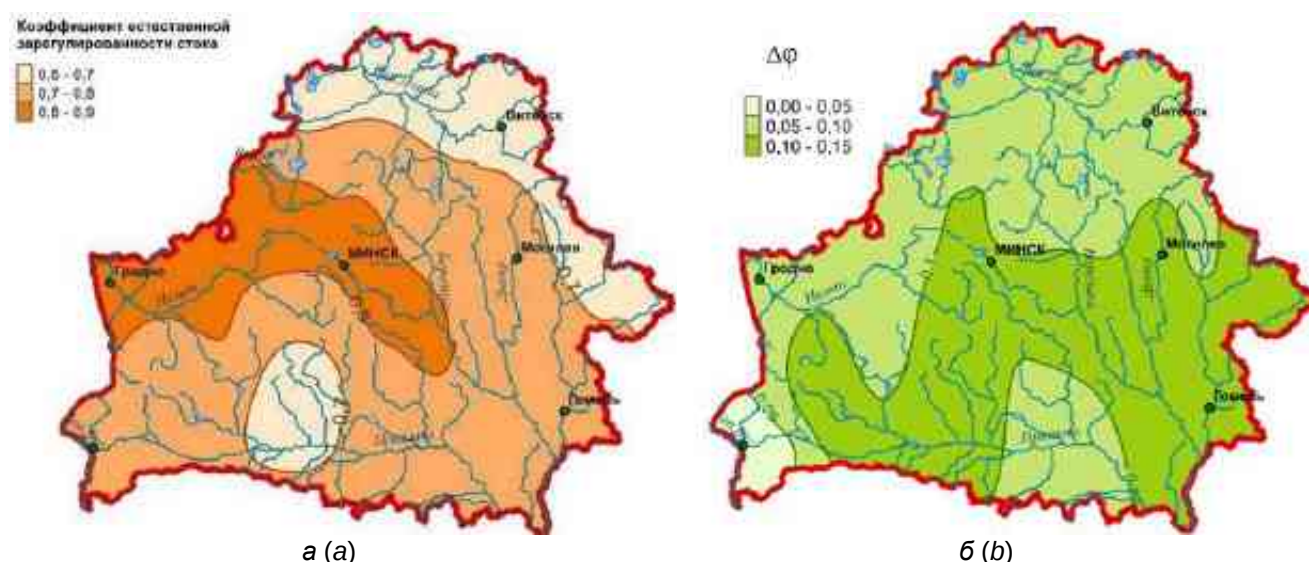


Рис. 10. Распределение по территории Беларуси коэффициента естественной зарегулированности стока ϕ (а) и его изменение ($\Delta\phi$) за период 1988–2017 гг. по отношению к периоду 1948–1987 гг. (б)
(автор: д-р геогр. наук А. А. Волчек)

Fig. 10. Distribution of the coefficient of natural runoff regulation ϕ (a) across the territory of Belarus and its change ($\Delta\phi$) for the period 1988–2017 in relation to the period 1948–1987 (b)
(author: D. Sc. (Geogr.) A. A. Volchek)

Гидрология озер. С целью повышения эффективности использования водных ресурсов и их качества выполнены лимнологические исследования, в рамках которых получены следующие основные результаты.

Выявлена закономерность уменьшения периода водообмена озер по мере смен эволюционных стадий их развития: для мезотрофных озер он равен в среднем 9 годам, для эвтрофных – 2,4, для дистрофных – 0,6 года. Наиболее значимым последствием потепления климата для озерных геосистем Беларуси является повышение температуры воды на 2–8 °C (наиболее вероятно – около 3 °C) при различных сценариях климатических изменений. В ходе исследований установлено, что в водоем-охладителе Лукомльской ГРЭС, озере Лукомское, в летний период минимальная площадь зоны подогрева характерна для дней с северо-западным и западным ветрами (менее 10 % площади акватории),

максимальная – при восточном и юго-восточном ветрах – до 20–25 % площади акватории. Выделяются две области с высокими температурами воды: у устья водоотводящего канала и в зоне сброса с Лукомльской ГРЭС. Максимальная температура воды у ГРЭС достигла 32,9 °С [25]. В целом по акватории температура воды увеличивалась с юга на север с 22,7 до 27 °С. За период потепления климата (с 1989 г.) рост термической устойчивости водной массы в озерах, на которых осуществляются стационарные наблюдения за температурой воды на рейдовых вертикалях, составил 20–35 %. Результаты исследований перспективны для использования государственными природоохранными учреждениями и учреждениями высшего образования (БГУ).

Впервые для территории Беларуси проведены комплексные исследования газового состава воды и донных отложений в разнотипных озерах. Установлены различия по показателю удельной газонасыщенности в зависимости от генетического типа озер. Выявлены особенности накопления и распределения газов в воде и донных отложениях разнотипных озер с учетом ландшафтных особенностей водосборных территорий (лесопокрывные, водно-болотные, антропогенно-нарушенные), определены факторы, влияющие на формирование газового режима в разнотипных озерах, а также вариабельность отдельных компонентов газового состава по сезонам года [26]. Полученные данные являются научной основой для оценки экологического состояния водных объектов, могут использоваться при изучении эмиссии парниковых газов (CO_2 , CH_4) в атмосферу, с которыми связывают текущее потепление климата (Институт природопользования НАН Беларуси, БГУ).

Решение проблем реабилитации нарушенных земель и минимизации сопутствующих экологических рисков. Деградация земель относится к числу наиболее актуальных экологических проблем Беларуси, одним из сдерживающих факторов ее устойчивого развития. В этом направлении получены важные практико-ориентированные результаты.

Выявлены особенности валового содержания в дерново-подзолистых песчаных почвах фоновых территорий юго-запада Беларуси тяжелых металлов и микроэлементов по расширенному их перечню (15 металлов и металлоидов). Впервые в Беларуси разработана и применена методика исследования почвенно-корневого и аэрального поступления тяжелых металлов в условиях различных эколого-геохимических ситуаций с помощью фестулолиума как тестового объекта, а также усовершенствована методика исследования аэрального загрязнения тяжелыми металлами с помощью сфагновых аэроловушек [27] (рис. 11). Установлена возрастающая роль трансграничного переноса Cd, Sb, As.

Выполнена оценка пространственных тенденций загрязнения в импактной зоне ООО «Белинвестторг-Сплав», показавшая, что реальный ареал воздействия предприятия выходит за границы существующей санитарно-защитной зоны в 1,7 раза по юго-восточному направлению преобладающего ветрового переноса, в результате чего геохимические аномалии по Pb отмечаются на расстоянии до 1200 м, что требует соответствующей корректировки санитарно-защитной зоны как по размерам, так и по конфигурации (Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси).

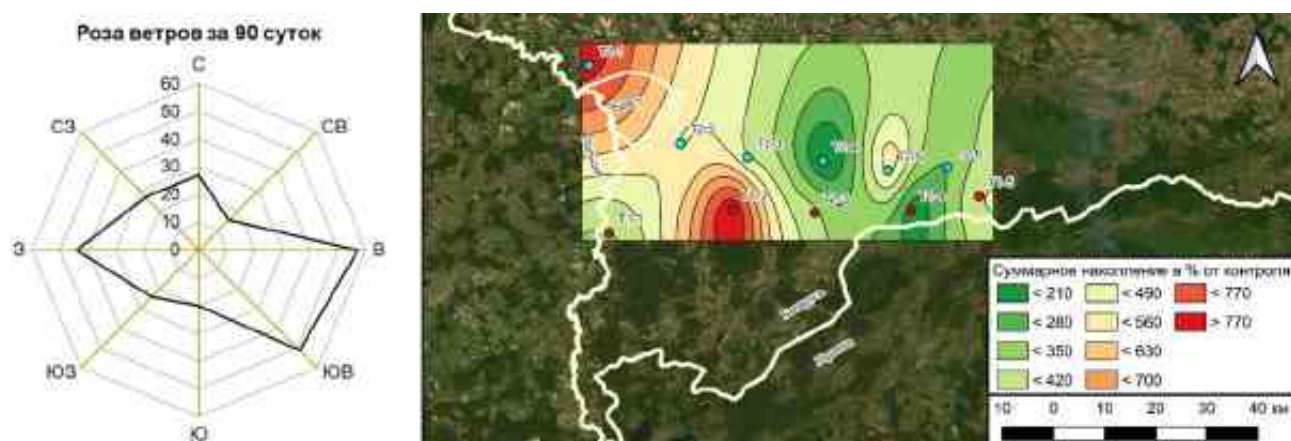


Рис. 11. Роза ветров и установленное пространственное распределение суммарного накопления тяжелых металлов сфагновыми ловушками, % относительно контроля
(авторы: канд. биол. наук Н. В. Михальчук, канд. биол. наук А. П. Колбас, канд. биол. наук Н. Ю. Колбас, В. С. Нестерук)

Fig. 11. Wind rose and the established spatial distribution of the total accumulation of heavy metals in sphagnum traps, % relative to the control
(authors: Ph. D. (Biol.) N. V. Mikhanchuk, Ph. D. (Biol.) A. P. Kolbas, Ph. D. (Biol.) N. Yu. Kolbas, V. S. Nesteruk)

Впервые дано научное обоснование беспочвенного восстановления плодородия земель, нарушенных добычей минерального сырья открытым способом. Внесение в песчаный субстрат микробных удобрений в первый год, хотя и незначительно, меняло величину микробной массы, но в дальнейшем (при двукратной обработке за сезон вегетации) способствовало расширению состава микробиоценоза, повышающего его функциональную активность, и, как следствие, обеспечивало улучшение агрохимического фона под лесными культурами в ходе выполнения работ по рекультивации нарушенных земель. На площади песчано-гравийного карьера «Рутковское» (2,2 га), переданном Новогрудскому лесхозу, проведены работы по экспериментальной апробации лабораторной технологии создания лесных культур сосны обыкновенной, ели европейской и березы бородавчатой с одновременным внесением агрономически ценных штаммов микроорганизмов для активизации и усиления мобилизации потенциального плодородия субстрата, накопления в нем органического вещества и элементов питания в доступной для лесных видов форме. Установлена перспективность использования препаратов штаммов *r. Enterobacter*, *r. Rahnella* и *r. Pseudomonas* в качестве биоудобрения для лесной рекультивации нарушенных земель. Это позволит растениям легче адаптироваться к сложным экологическим условиям. Применение полученных результатов ориентировано на возврат техногенно нарушенных земель в хозяйственный оборот путем их биологической рекультивации на научной основе и создание новой устойчиво продуцирующей лесной экологической системы [28] (*Центральный ботанический сад НАН Беларуси*).

Разработана установка для исследования криогенной миграции влаги и морозного пучения слабых грунтов в открытой системе. Получены новые данные об изменении теплофизических характеристик, фазового состава воды, характеристик переноса влаги, солей, морозного пучения и структурно-текстурных параметров в слабых грунтах, засоленных хлористым натрием. Созданы макеты устройства для определения характеристик сорбции воды грунтами и устройства для определения компрессионных характеристик грунтов. Выявлена закономерность снижения влагопереноса под воздействием градиента температуры в мерзлой зоне засоленной горной породы. Усовершенствованы математические модели и программные средства для моделирования переноса тепла, влаги и водорастворимых соединений, а также криогенного пучения и преобразования структуры при промерзании слабых грунтов. Полученные результаты предполагается использовать для обоснования специальных методов проходки шахтных стволов калийных рудников в сложных гидрогеологических условиях с применением искусственного замораживания, а также для снижения морозного пучения слабых грунтов [29] (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Почвенные условия региона напрямую влияют на содержание минеральных веществ в кормах. В Брестской области выявлен выраженный дефицит микроэлементного состава заготавливаемых травяных кормов. Так, дефицит по Zn (до 10 мг/кг) и Mn (до 20 мг/кг) имеют более 55 % кормов, по Cu (до 3,0 мг/кг) – более 90, по Mg (до 0,4 г/кг) – около 27 % кормов [30]. Установлено, что концентрации Cu, Mn и Mg в сенажах из многолетних трав превышают аналогичные показатели в силосе из кукурузы. Независимо от видового состава критически низким для всех травяных кормов Брестской области является содержание Cu, составляющее, как правило, 0,5–2,0 мг/кг, что соответствует крайне низкой обеспеченности. Полученные данные используются для составления сбалансированных рационов кормления высокопродуктивных животных в части минеральной обеспеченности кормов, их адресной балансировки минеральными добавками, а также корректировки геохимического статуса кормовых угодий. Созданы и зарегистрированы 46 калибровочных моделей для анализа показателей качества кормов и кормового сырья методом Фурье-спектроскопии в ближней инфракрасной области (Свидетельство о добровольной регистрации и депонировании объекта авторского права от 10.06.2024 № 5-БД). Апробация разработки осуществлена в рамках 15 обучающих семинаров для руководителей и ведущих специалистов агропромышленного комплекса Республики Беларусь и в производственную деятельность Берёзовского и Брестского районов, ГУ «Минская областная ветеринарная лаборатория» (*Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси*).

Разработки в области развития низкоуглеродной, «зеленой» экономики. Разработаны методические основы формирования комплексной системы национальных индикаторов устойчивого природопользования, обоснована структура и разработана сама комплексная система, включающая ключевые индикаторы воспроизводства природного/экологического капитала и «зеленого» роста, адаптированная к целям устойчивого развития для сферы природопользования с учетом актуальных тенденций построения системы природно-экономического учета Республики Беларусь. Разработаны предложения по имплементации результатов в практику управления природопользованием с учетом опыта Республики Беларусь и рекомендаций международных организаций [31] (*БГТУ*).

В настоящее время в мире активно разрабатываются вопросы, связанные с экосистемными услугами, которые определяются как выгоды, получаемые от экосистем. В рамках подпрограммы разработан методический подход к оценке экосистемных функций и услуг природных и природно-

техногенных геосистем в условиях урбанизированных территорий. Проведена оценка структуры и организации геосистем пригородной территории Минска по условиям выполнения ими экосистемных функций в интересах города. Разработана схема ранжирования территории по эколого-ресурсной значимости местных геосистем применительно к оздоровительной, водохозяйственной и рекреационной функциям и их сочетаниям (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Разработана научно обоснованная концептуальная структурно-логическая модель (алгоритм) содержания и последовательности оценки экосистемных услуг агроландшафтов и слагающих их природных компонентов. Определен перечень основных экологических и социально-экономических функций, выполняемых агроландшафтами. Выполнена классификация экосистемных услуг агроландшафтов, обусловленных структурно-функциональными особенностями аграрного землепользования. Разработана и внедрена РУП «Учхоз БГСХА» методика эколого-экономической оценки (стоимости) размеров ущерба, нанесенного водной эрозией почвам агроландшафтов с учетом снижения недобора сельскохозяйственных культур (обеспечивающих) и потере питательных веществ в почвах (регулирующих) экосистемных услуг. Определены методические подходы и произведен расчет стоимости регулирующей роли экосистемных услуг агроландшафтов в результате поглощения сельскохозяйственными культурами органического углерода (CO_2) как источника парниковых газов, а также выполняемых агроландшафтами культурных экосистемных услуг как объектов агрокультурного наследия. Разработан проект Методических рекомендаций по оценке экосистемных услуг агроландшафтов при обосновании территориально-организационных мероприятий для устойчивого их использования и охраны, создан учебный модуль «Экосистемные услуги агроландшафтов: сущность, назначение, практика применения», внедренный в образовательный процесс. Полученные результаты позволяют более обоснованно определять эколого-экономическую эффективность территориального планирования аграрного землепользования, актуализировать сведения о природном потенциале земельного фонда, его трансформации и перераспределения между землепользователями, а также усовершенствовать мероприятия по улучшению и охране земель [32] (*БГУ*).

Выявлены закономерности формирования торфяников после повторного заболачивания, что расширяет теоретическую базу болотообразования и создает основу для разработки научно обоснованных методов мониторинга и ренатурализации. Выполненные исследования показали, что повторное заболачивание торфяных месторождений способствует восстановлению экосистем и углеродного цикла. На верховых болотах выявлены две стадии восстановления гидрологического режима, сопровождающиеся возвращением сфагновых сообществ, а на низинных – три стадии, отражающие более сложную динамику из-за богатого минерального питания. Комплексный анализ растительности, гидрохимии и дистанционного зондирования позволил уточнить механизмы сукцессии и предложить индикаторы для долгосрочного мониторинга болотных систем [33]. Результаты могут использоваться при разработке программ восстановления и охраны болотных экосистем, включая проекты по ренатурализации торфяников (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Научно обоснованы классификация и структурно-функциональная типология культурных ландшафтов Беларуси. Разработано и выполнено культурно-ландшафтное районирование Беларуси, основанное на выделении таксономических единиц регионального и локального уровней. Выполнен пространственный анализ и проведена оценка природного и историко-культурного наследия в разрезе ландшафтных провинций, округов, ключевых районов Беларуси. Определены экологически обоснованные направления устойчивого землепользования, сохраняющие исторический облик культурных ландшафтов [34]. Результаты исследования внедрены в образовательный процесс БГУ и нашли практическое применение в деятельности ГУП «Национальное кадастровое агентство» (*БГУ*).

Разработана схема и комплекс мер по снижению рекреационных нагрузок на лесные экосистемы для устойчивого развития экотуризма в лесном хозяйстве. Предложены лесохозяйственные и лесокультурные, организационные и информационные меры. Проанализирована информация о лесорекреационных ресурсах и их расположении на территории лесного фонда при организации экологических маршрутов в семи лесхозах Могилёвской области. Лесорекреационные ресурсы включают объекты лесохозяйственного хозяйства, памятники природы, заказники, места произрастания дикорастущих растений, включенных в Красную книгу Республики Беларусь, и места обитания редких животных. Рассчитаны планируемые максимальные рекреационные нагрузки на лесорекреационные ресурсы лесхозов Могилёвской области для экотуризма, которые составили от 31 (в Чаусском лесхозе) до 697 человек в день (в Осиповичском опытном лесхозе). Результаты перспективны для организации новых экологических маршрутов и туров на территории лесного фонда Могилёвской области [35] (*ГТТУ*).

Рациональное природопользование, создание новых технологий и препаратов. В рамках подпрограммы получили дальнейшее развитие исследования, направленные на разработку биосферно-совместимых и энергоэффективных методов использования и переработки ресурсов твердых горючих ископаемых с целью получения экологически безопасной продукции с регулируемыми свойствами на основе отходов торфяной промышленности и растительного сырья.

Созданы теоретические основы расчета и разработана принципиальная схема технологии скважинной гидродобычи залегающего под торфом сапропеля. Расчет скважинной гидродобычи сапропеля, находящегося под слоем торфа, выполнен с учетом реальных условий его залегания и общетехнических свойств. Получены новые данные по затратам энергии при освоении месторождений сапропеля под торфом разработанным способом добычи, показавшие энергетические преимущества нового способа добычи по сравнению с применяемой в настоящее время экскаваторной технологией за счет уменьшения количества задействованной техники, сведения к минимуму транспортных операций, экономии энергии при операциях сушки и уборки. Экономия удельных затрат энергии возможна за счет операции экскавации сапропеля. Установлены ограничения для применения экскаваторной технологии и скважинной гидродобычи сапропеля из-под торфа, обоснованы критерии выбора технологий разработки торфоподстилающего сапропеля [36]. Результаты позволяют систематизировать месторождения сапропеля под торфом по горно-геологическим параметрам и рекомендовать технологии разработки. В Гродненской области из выявленных 22 перспективных для разработки сапропеля месторождений 15 рекомендуется разрабатывать по скважинной технологии, 2 – по экскаваторной и 5 – по скважинной или экскаваторной. Энергетическая оценка добычи сапропелевого сырья по новой технологии может применяться на стадии технико-экономического обоснования системы разработки месторождения (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Установлено влияние количества введенного модификатора и температуры пиролиза на сорбционные свойства и выход продуктов пиролиза торфа, модифицированного неорганическими соединениями, а также композитов торфа, целлюлозосодержащих материалов и продуктов переработки нефти [37]. Методом ИК-спектроскопии установлен механизм химической модификации углеродсодержащего сырья гидроксидом натрия, заключающийся во взаимодействии иона натрия с Н-карбоксиметилом и Н-карбоксильными группами, а также азотной кислотой, приводящей к структурным изменениям в углеродной матрице с образованием новых функциональных групп: карбонильных, карбоксильных, гидроксильных, нитратных и амидных. Установленная способность окисленных углей сорбировать ионы переходных металлов и зависимость величины сорбции и коэффициентов распределения от природы сорбируемых ионов, имеющих усложненную электронную структуру, свидетельствуют об избирательности сорбционных материалов. Выполненный комплекс работ по направленной химической и термохимической модификации целлюлозо- и гумусосодержащего сырья позволил получить активированные угли находящиеся на уровне товарных аналогов (рис. 12) (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

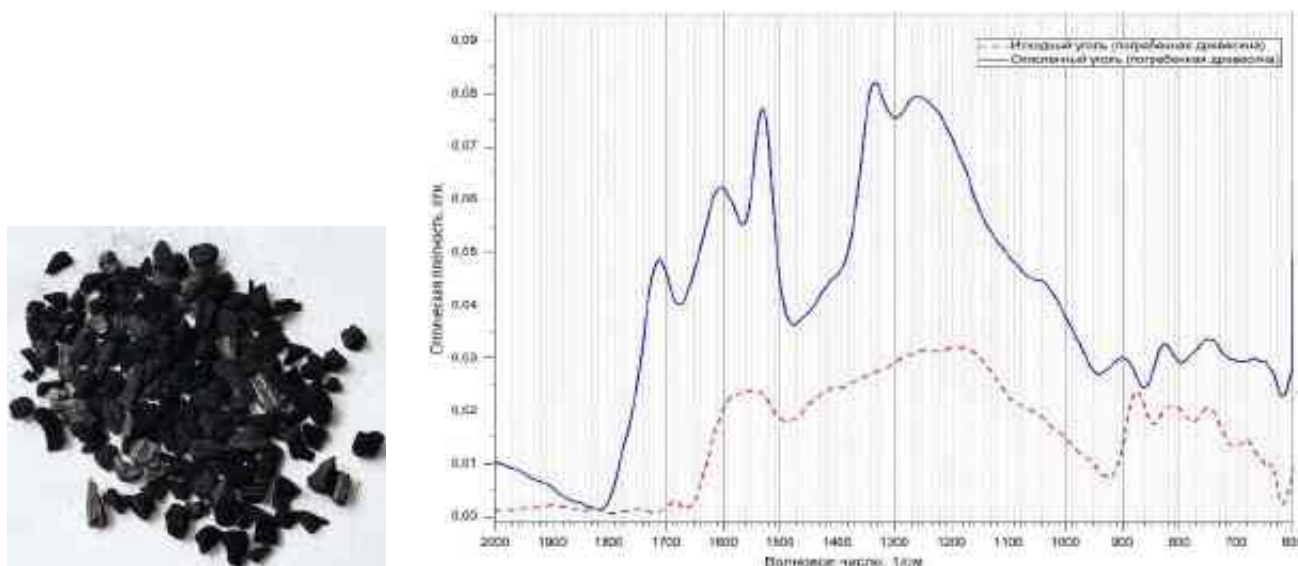


Рис. 12. Окисленный уголь из погребенной под торфом древесины и его ИК-спектры
(авторы: канд. хим. наук А. Э. Томсон, канд. техн. наук Т. Я. Царюк,
канд. техн. наук Т. В. Соколова, канд. физ.-мат. наук Ю. Ю. Навоша)

Fig. 12. Oxidized coal from wood buried under peat and its IR spectra
(authors: Ph. D. (Chem.) A. E. Tomson, Ph. D. (Techn.) T. Ya. Tsaryuk,
Ph. D. (Techn.) T. V. Sokolova, Ph. D. (Phys.-Math.) Yu. Yu. Navoscha)

Установлены закономерности направленной термохимической модификации сфагнового торфа и сфагнового мха методами окислительной и гидролитической деструкции при получении биологически активных препаратов, проявляющих выраженную антимикробную активность в отношении фитопатогенных бактерий, а также высокое бактерицидное действие против возбудителей, вызывающих болезни сельскохозяйственных животных. Показано, что введение в оксидаты и гидролизаты микроэлементов, обладающих биоцидными свойствами, расширяет спектр действия и усиливает антимикробные свойства комплексных препаратов. Установлено присутствие в составе комплексных препаратов биологически активных соединений различных классов, проявляющие бактерицидные и фунгицидные свойства. Выраженная биоцидная активность комплексных препаратов, полученных на основе продуктов окислительно-гидролитической деструкции сфагнового торфа и мха с микроэлементами, в отношении ряда фитопатогенных микроорганизмов, показывает перспективность получения на их основе экологически безопасных средств защиты растений от болезней [38] (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Получены физико-химические характеристики образующегося нефтяного кокса и твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий, установлены зависимости процессов удаления поверхностной влаги с полученных кусков и частиц нефтяного кокса и твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий, а также зависимости, необходимые для расчетов процессов и оборудования по их переработке для придания необходимых физико-механических свойств. Теоретические и экспериментальные исследования получения порошков равномерного гранулометрического состава из твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий, нефтяного кокса, а также исследования процесса измельчения отходов полимерных композиционных материалов позволили разработать перспективные энергоэффективные способы переработки твердых материалов. Разработаны экспериментальные установки получения порошков равномерного гранулометрического состава и исследования процесса механической переработки отходов стеклопластика [39] (*БГТУ*).

Определены параметры продуктов сгорания экспериментальных образцов композитных топливных брикетов с различным соотношением торфа и компонентов растительного происхождения: опилки, солома, льнокостра. Выявлено влияние основных технологических характеристик композитного топлива на состав и объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Установлено, что добавление биотоплива к торфу снижает удельный объем выбросов твердых частиц на единицу энергии. Результаты создают возможность прогнозирования выбросов при сжигании местных видов топлива и оптимизации состава топлива для снижения воздействия на атмосферный воздух. Разработаны рекомендации по сокращению выбросов оксидов азота, углерода и серы при использовании газоочистных установок сухого и мокрого типа, предназначенные для планирования природоохранных мероприятий [40] (*БНТУ*).

Разработаны модели переноса соединений тяжелых и редких металлов тонкодисперсными и высокомолекулярными фракциями, гуминовыми соединениями и фульвокислотами в природной и техногенной средах. Модели учитывают конвективный перенос тонкодисперсных и высокомолекулярных фракций, гуминовых соединений и фульвокислот, соединений тяжелых и редких металлов, а также обмен между высокомолекулярными и низкомолекулярными компонентами; учитывается диффузионная подвижность всех компонентов. Отработаны методики и созданы макеты установок для исследования выщелачивания в статическом и динамическом режимах тяжелых и редких металлов с помощью фульвоподобных кислот в природной и техногенной средах [41]. Результаты исследований создают возможность увеличения производительности обработки загрязненных радионуклидами и тяжелыми металлами водных растворов на 20–40 % (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Приведенные выше научные результаты дают общее представление об итогах выполнения подпрограммы «Природные ресурсы и их рациональное использование» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» в 2021–2025 гг., а также в целом характеризуют решавшиеся в Республике Беларусь в этот период проблемные вопросы в области природопользования и охраны окружающей среды.

Использование полученных научных разработок. Научные результаты использованы при выполнении 746 прямых хозяйственных договоров, включая 309 договоров в области аккредитации, на сумму превышающую 5,8 млн руб., а также при реализации 20 международных контрактов на 319,7 тыс. долл. США.

По результатам исследований подготовлено и подано около 60 проектов заданий (мероприятий) в прикладные научные программы, инициировано выполнение 1 инновационного проекта за счет средств инновационного фонда Брестского областного исполнительного комитета. Результаты, полученные за весь период выполнения подпрограммы, использованы при выполнении 38 заданий и мероприятий государственных научно-технических программ и государственных программ.

Отдельные разработки внедрены и используются организациями, заинтересованными в результатах выполнения заданий подпрограммы, о чем свидетельствуют письменные подтверждения. Всего получено 158 актов о внедрении и справок об использовании научных результатов, из них 66 – от организаций реального сектора экономики, 92 – от высших учебных заведений.

В качестве примера можно отметить тесные научно-производственные связи Полесского аграрно-экологического института НАН Беларуси с предприятиями АПК всех 16 районов Брестской области в рамках Плана совместной работы отраслевой научно-исследовательской лаборатории качества кормов. Планы на 2024–2025 гг. согласованы представителями Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, комитета по сельскому хозяйству и продовольствию Брестского областного исполнительного комитета и Национальной академии наук Беларуси.

Выполнен ряд разработок, которые нашли практическое применение в практике градостроительного планирования организаций Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь: УП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА» – материалы по оценке экологического состояния и экосистемных услуг зеленых насаждений общего пользования г. Жодино, полученные исполнителями из БГУ; УП «Минскградо» – разработки по оценке состояния и устойчивости природных комплексов, включая перечни мероприятий по оптимизации планируемой хозяйственной деятельности, реабилитации нарушенных территорий, разработанные в Институте природопользования НАН Беларуси.

Разработанные исполнителями из БНТУ рекомендации по модернизации действующего пылегазоочистного оборудования на котельных установках при сжигании местных видов топлив и методические подходы к проведению инвентаризации загрязняющих веществ с учетом технологических нормативов удельных выбросов при сжигании местных видов топлив и гигиенической оценки качества атмосферного воздуха в районе расположения частного научно-производственного унитарного предприятия «Экологический центр «Пылегазоочистка» использованы в производственном процессе данной организации.

Исполнителями из БГТУ создана ударно-центробежная мельница, предназначенная для измельчения полимерных стеклонаполненных отходов производства полимерной продукции. В рамках сотрудничества с зарубежным партнером ООО «Гелькоут Трейд» (Нижний Новгород, Россия) разработка, обладающая рядом преимуществ по отношению к измельчителям другой конструкции, внедрена на данном предприятии.

Институт природопользования НАН Беларуси активно сотрудничал с российскими организациями по вопросам исследования физико-механических, деформационных, реологических и теплофизических свойств горных пород при воздействии отрицательных температур, что подтверждается выполненными договорными работами, заключенными с ООО «ЕвроХим-УКК» (Пермский край, Российская Федерация) и ООО «Протех Инжиниринг» (г. Москва, Российская Федерация).

Установились прочные научные связи исполнителей из Института физики НАН Беларуси с коллегами из КНР по вопросам исследования атмосферного аэрозоля в рамках Соглашения о сотрудничестве с Международным центром науки будущего Цзилинского университета (Цзилинь, Чанчунь, КНР), что подтверждается выполненными международными контрактами.

Представленные выше сведения свидетельствуют об актуальности и востребованности полученных научных результатов, а также о значительном вкладе подпрограммы в достижение основных целей программы.

Заключение. Фундаментальные научные исследования в области природопользования в 2026–2030 гг. будут развиваться в рамках утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 09.10.2025 № 555 «О перечне государственных программ научных исследований на 2026–2030 годы» и постановлением Президиума Национальной академии наук Беларуси от 30 декабря 2025 г. № 39 «О государственных программах научных исследований на 2026–2030 годы» ГПНИ «Рациональное природопользование». Структурно программа состоит из трех подпрограмм: «Экология и рациональное использование природных ресурсов», «Биоразнообразие и биоресурсы» и «Белорусские недра», т. е. охватывает все сферы природопользования.

Цели ГПНИ «Рациональное природопользование» на 2026–2030 годы:

- получение новых знаний и способов их применения для восстановления нарушенных земель и природных экосистем, снижения негативного воздействия на окружающую среду, в том числе загрязнения радионуклидами;
- создание и отработка инновационных методов мониторинга и управления экологическими рисками на основе искусственного интеллекта и больших геоданных;
- научное обоснование экологически безопасных способов создания композиционных материалов многоцелевого назначения на основе переработки природных ресурсов и вторичного сырья;
- развитие научных основ сохранения биологического разнообразия растительного и животного мира, воспроизводства и рационального использования биологических ресурсов;

- совершенствование методов предупреждения возникновения очагов вредителей лесных насаждений и сельскохозяйственных культур, паразитарных заболеваний;
- оценка распространения, оптимизация путей регулирования и ограничения негативного воздействия агрессивных чужеродных (инвазивных) видов животных и растений;
- комплексное изучение вещественного состава горных пород, динамики и химического состава подземных вод, строения и эволюции основных структур платформенного чехла и кристаллического фундамента Беларуси для проведения геологической съемки нового поколения, прогнозирования полезных ископаемых на недостаточно изученных территориях, рационального и экологически безопасного использования ресурсов недр.

Для достижения целей программы необходимо решить ряд задач, отвечающих национальным интересам Республики Беларусь в экологической и биологической сферах, а также в сфере рационального недропользования. Цели и задачи программы и входящих в ее состав подпрограмм соответствуют приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026–2030 гг., утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 01.04.2025 № 135:

1. Цифровые технологии и искусственный интеллект: программное обеспечение и программно-технические средства.

2. Инновационные технологии в промышленности: новые материалы с заданными свойствами; технологии извлечения и переработки (очистки, обогащения) полезных ископаемых; ресурсосберегающие технологии переработки отходов.

3. Биологические, химико-фармацевтические и медицинские технологии: технологии управления лесными ресурсами и их воспроизводства; технологии сохранения и экологической реабилитации природных экосистем.

5. Научное и научно-техническое обеспечение безопасности человека, общества и государства: биологическая и экологическая безопасность (в том числе ядерная и радиационная безопасность).

Решение поставленных в рамках программы задач будет способствовать устойчивому природно-ресурсному обеспечению социально-экономического развития Республики Беларусь за счет повышения эффективности использования и охраны природных ресурсов, их дополнительного вовлечения в экономику страны, предупреждения развития негативных последствий от возрастающего антропогенного воздействия на природную среду и происходящих климатических изменений.

Список использованных источников

1. Какарека, С. В. Тренды содержания закисляющих и эвтрофирующих соединений в атмосферных осадках на урбанизированной территории / С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич // Доклады НАН Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 6. – С. 724–733.
2. Application of optimal interpolation to spatially and temporally sparse observations of aerosol optical depth / N. Miatselskaya, G. Milinevsky, Bril A. [et al.] // Atmosphere. – 2023. – Vol. 14, № 1. DOI: 10.3390/atmos14010032.
3. Струк, М. И. Приоритетные направления долгосрочного планирования природных экосистем пригородной территории Минска / М. И. Струк, С. Г. Живнач // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 157–170.
4. Романкевич, Ю. А. Оценка геоэкологического потенциала природных комплексов малых городов Беларуси // Ю. А. Романкевич / Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 64–72.
5. Shchasnaya, I. Assessment of the environment-forming functions of green spaces of urban landscapes in industrial centers of Belarus using geoinformation technologies / I. Shchasnaya, D. Varabyou // III International conference "Sustainable development: agriculture, energy and ecology" (VMAEE-III 2024), Karshi, Uzbekistan, February 26–28, 2024 / AIP Conf. Proc. – 2024. – Vol. 3184. – Art. 020044. – DOI: 10.1063/5.0212165.
6. Счастливая, И. И. Пространственно-временной анализ структуры урболандшафтов как основы оценки экологических рисков в промышленных городах Беларуси (на примере г. Бобруйска) / И. И. Счастливая // История наук о Земле : сб. ст. / отв. ред. В. М. Чеснов ; науч. ред. В. А. Широкова ; сост. Н. А. Озерова, Н. М. Эрман. – М. : Янус-К, 2023. – Вып. 7. – С. 42–51.
7. Сысоева, В. А. Градостроительная типология эколого ориентированных моделей для городов Беларуси / В. А. Сысоева, П. Г. Вардеванян // Архитектура : сб. науч. тр. / редкол.: А. С. Сардаров (гл. ред.) [и др.]. – Мн. : БНТУ, 2025. – Вып. 18. – С. 81–87.
8. Домась, А. С. О взаимосвязи между показателями гумуса и целлюлозолитической способностью некоторых почв урбанизированных территорий / А. С. Домась, Н. В. Шкуратова, Е. В. Чипурных // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2025. – № 2. – С. 38–47.
9. Басалай, Е. Н. Влияние городских очистных сооружений на природные воды и почвы / Е. Н. Басалай, В. С. Хомич ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Мн. : Бел. навука, 2025. – 201 с.
10. Лицкевич, А. Н. Осадки сточных вод и качество продукции на их основе / А. Н. Лицкевич, М. В. Гулькович, О. Е. Чезлова // Наука и инновации. – 2021. – № 11. – С. 16–21.
11. Дударчик, В. М. Утилизация нефтешламов методом пиролиза с торфом / В. М. Дударчик, В. М. Крайко, Е. В. Ануфриева // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 137–143.

12. Матвеев, А. В. Районирование территории Центральной Беларуси по степени комфортности геологической среды для жизнедеятельности населения / А. В. Матвеев, Е. А. Кухарик, А. С. Глаз // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 1. – С. 57–63. – DOI: 10.29235/1561-8323-2025-69-1-57-63.
13. Жогло, В. Г. Подземные воды Подляско-Брестской впадины: динамика, ресурсы, экология / В. Г. Жогло ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Мн. : Бел. навука, 2025. – 155 с.
14. Лукашѳв, О. В. Закономерности аккумуляции металлов в современных донных отложениях р. Свислочь / О. В. Лукашѳв // Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий : материалы III Междунар. науч. конф., Минск, 15 дек. 2021 г. – Мн., 2021. – С. 238–267.
15. Автушко, М. И. Новые данные о поступлении радона в среду обитания человека / М. И. Автушко, А. В. Матвеев, С. А. Исаченко // Доклады НАН Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 3. – С. 355–360.
16. Матвеев, А. В. Муравинское межледниковье на территории Белорусского Полесья / А. В. Матвеев, Т. Б. Рылова, А. В. Шидловская. – Мн. : Бел. навука, 2024. – 197 с.
17. Зерницкая, В. П. Позднеледниковье и голоцен Беларуси: геохронология, осадконакопление, растительность и климат / В. П. Зерницкая ; под ред. А. В. Матвеева. – Мн. : Бел. навука, 2022. – 303 с.
18. Логинов, В. Ф. Современные изменения климата / В. Ф. Логинов. – СПб. : ЛЕМА, 2024. – 267 с.
19. Лысенко, С. А. Сценарные прогнозы изменения климата Беларуси на основе регионально оптимизированных ансамблей гидродинамических моделей проекта CMIP6 / С. А. Лысенко // Метеорология и гидрология. – 2025. – № 7. – С. 65–79.
20. Пугачевский, А. В. Дифференциация и районирование территории Беларуси по характеру реакции хвойных лесов на изменение климата / А. В. Пугачевский // Формирование высокопродуктивных и биологически устойчивых лесных насаждений в условиях меняющегося климата: современное состояние и пути решения : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию Жорновской экспериментальной лесной базы Института леса НАН Беларуси, Осиповичи, 25–27 сент. 2024 г. / редкол.: А. И. Ковалевич (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2024. – С. 139–143.
21. Матюшевская, Е. В. Ель и сосна в экологически напряженных лесных ландшафтах Беларуси / Е. В. Матюшевская ; под. общ. ред. В. Н. Киселева. – Мн. : БГУ, 2021. – 191 с.
22. Новое агроклиматическое районирование и оценка агроклиматических ресурсов территории Беларуси за 2000–2022 гг. / В. И. Мельник, С. А. Лысенко, Ю. А. Бровка [и др.] // Природные ресурсы. – 2025. – № 1. – С. 5–21.
23. Regularities of variability in average monthly flow rates during the low-water period in the rivers of Belarus / S. V. Sidak, A. A. Volchak, S. I. Parfomuk, V. A. Kofanov // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – № 3 (132). – P. 78–82.
24. Волчек, А. А. Ландшафтно-экологическое состояние речных бассейнов западной части полесской провинции / А. А. Волчек, И. В. Окоронко. – М. : РУСАЙНС, 2025. – 172 с.
25. Суховило, Н. Ю. Тепловой режим озера Лукомское в условиях климатических изменений и теплового загрязнения / Н. Ю. Суховило // Географія. – 2023. – № 1. – С. 20–27.
26. О современном состоянии исследований газового состава вод и донных отложений озер / В. П. Зерницкая, Б. П. Власов, Е. А. Кухарик [и др.] // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5, Біялогія. Навукі аб Зямлі. – 2025. – № 2. – С. 110–124.
27. Оценка аэрального загрязнения потенциально токсичными элементами импактных зон методом моховых ловушек / А. П. Колбас, Н. Ю. Колбас, В. С. Нестерук, Н. В. Михальчук // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5, Біялогія. Навукі аб Зямлі. – 2025. – № 2. – С. 125–135.
28. Агрохимическая характеристика почвы лесных экосистем вокруг цементных производств Республики Беларусь / А. М. Николайчук, А. П. Яковлев, М. Н. Вашкевич, С. Ф. Жданец // Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. – 2023. – № 1 (118). – С. 46–51.
29. Агутин, К. А. Установки и методики исследования характеристик массопереноса и пучения при промерзании грунтов / К. А. Агутин, Г. П. Бровка, И. В. Дедюля // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 148–159.
30. Пастухова, М. А. Градация травяных кормов Брестской области по содержанию цинка / М. А. Пастухова, Б. В. Шелюто // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 2. – С. 111–115.
31. Неверов, А. В. Национальные индикаторы воспроизводства природного капитала / А. В. Неверов, Н. А. Масилевич, А. В. Равино // Труды БГТУ. Серия 5, Экономика и управление. – 2023. – № 1 (268). – С. 31–40.
32. Червань, А. Н. Методические подходы и практическое применение результатов оценки деградации земель/ почв Беларуси / А. Н. Червань, Н. Н. Цыбулько, В. М. Яцухно // Известия РАН. Серия географическая. – 2022. – Т. 86, № 1. – С. 55–68.
33. Стадии повторного заболачивания на выработанном участке торфяного месторождения низинного типа Ивановское / О. Н. Ратникова, В. А. Ракович, Т. Д. Ярмошук [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2025. – № 1 (40). – С. 58–66.
34. Кузьмин, С. Исследование культурного ландшафта как объекта природного и историко-культурного наследия в контексте устойчивого развития территорий (на примере Браславского региона Республики Беларусь) / С. Кузьмин, Е. Давыдик, А. Сазонов // Вестник Ошского государственного университета. Химия. Биология. География. – 2025. – № 1 (6). – С. 112–141.
35. Ермолина, И. В. Методические основы социально-эколого-экономической оценки туристического потенциала лесного фонда лесхозов для развития экологического туризма / И. В. Ермолина // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2022. – № 1. – С. 98–108.
36. Экспериментальные исследования технологии скважинной гидродобычи сапропеля из-под торфа / Б. В. Курзо, В. Б. Кунцевич, О. М. Гайдукевич [и др.] // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 138–147.

37. Влияние модифицирующих добавок на формирование пористой структуры торфяного кокса / А. Э. Томсон, Т. В. Соколова, Т. Я. Царюк [и др.] // Природопользование. – № 1. – 2023. – С. 198–205.
38. Антимикробная активность препаратов из сфагнового торфа и сфагнового мха с микроэлементами / Н. А. Жмакова, Н. Л. Макарова, Е. А. Семенчукова, А. А. Муратова // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 146–155.
39. Эффективное измельчение твердого топлива в турбулизированном слое / Н. А. Аннаев, А. Э. Левданский, Х. С. Нурмухамедов [и др.] // Universum: технические науки. – 2024. – № 7(124). – С. 29–38.
40. Эколого-технологические аспекты использования местных видов топлива на основе биомассы в энергетических целях / О. И. Родькин, Е. В. Зеленуха, В. И. Глуховский, С. А. Лаптенко // Научные горизонты : междунар. науч. журн. – 2024. – № 7(83). – С. 72–86.
41. Шелоник, М. А. Фитотоксические свойства фульвоподобных соединений торфа / М. А. Шелоник, Ю. Г. Янута // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 196–202.

References

1. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. *Trendy sodержaniya zakislyayushchikh i evtrofiruyushchikh soyedineniy v atmosferykh osadkakh na urbaniziro-vannoy territorii* [Trends in the content of acidifying and eutrophating compounds in atmospheric precipitation in an urbanized area]. *Doklady NAN Belarusi = Reports of the NAS of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 6, pp. 724–733. (in Russian)
2. Miatselskaya N., Milinevsky G., Bril A., Chaikovskiy A., Miskevich A., Yukhymchuk Y. Application of optimal interpolation to spatially and temporally sparse observations of aerosol optical. *Atmosphere*, 2023, vol. 14, no. 1. DOI: 10.3390/atmos14010032.
3. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Prioritetnyye napravleniya dolgosrochnogo planirovaniya prirodnkh ekosistem prigorodnoy territorii Minska* [Priority areas of long-term planning of natural ecosystems of the suburban area of Minsk]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2022, no. 2, pp. 157–170. (in Russian)
4. Romankevich Yu. A. *Otsenka geoeologicheskogo potentsiala prirodnkh kompleksov malyykh gorodov Belarusi* [Assessment of the geoeological potential of natural complexes of small towns in Belarus]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 64–72. (in Russian)
5. Shchasnaya I., Varabyou D. Assessment of the environment-forming functions of green spaces of urban landscapes in industrial centers of Belarus using geoinformation technologies. III International conference "Sustainable development: agriculture, energy and ecology" (VMAEE-III 2024), Karshi, Uzbekistan, February 26–28, 2024. AIP Conf. Proc., 2024, vol. 3184, art. 020044. DOI: 10.1063/5.0212165.
6. Schastnaya I. I. *Prostranstvenno-vremennyy analiz struktury urbolandshaftov kak osnovy otsenki ekologicheskikh riskov v promyshlennykh gorodakh Belarusi (na primere g. Bobruyska)* [Spatio-temporal analysis of the structure of urban landscapes as a basis for assessing environmental risks in industrial cities of Belarus (using the city of Bobruisk as an example)]. *Istoriya nauk o Zemle: sbornik statej* [History of Earth Sciences: collection of articles]. Moscow: Janus-K Publ., 2023, iss. 7, pp. 42–51. (in Russian)
7. Sysoyeva V. A., Vardevanyan P. G. *Gradostroitel'naya tipologiya ekologo oriyentirovannykh modeley dlya gorodov Belarusi* [Urban planning typology of ecologically oriented models for the cities of Belarus]. *Arkhitektura: sbornik nauchnykh trudov* [Architecture: collection of scientific papers]. Minsk, BNTU Publ., 2025, no. 18, pp. 81–87. (in Russian)
8. Domas' A. S., Shkuratova N. V., Chipurnykh Ye. V. *O vzaimosvyazi mezhdu pokazatelyami gumusa i tsellyulozoliticheskoy sposobnost'yu nekotorykh pochv urbanizirovannykh territoriy* [On the relationship between humus indicators and cellulolytic capacity of some soils in urbanized areas]. *Vesnik Brestskago universiteta = Bulletin of the Brest University. Series 5, Chemistry. Biology. Sciences on Earth*, 2025, no. 2, pp. 38–47. (in Russian)
9. Basalay Ye. N., Khomich Ye. N. *Vliyaniye gorodskikh ochistnykh sooruzheniy na prirodnyye vody i pochvy* [The Impact of Urban Wastewater Treatment Facilities on Natural Waters and Soils]. Minsk, 2025, 201 p. (in Russian)
10. Litskevich A. N., Gul'kovich M. V., Chezlova O. Ye. *Osadki stochnykh vod i kachestvo produktsii na ikh osnove* [Sewage sludge and the quality of products based on it]. *Nauka i innovatsii = Science and Innovation*, 2021, no. 11, pp. 16–21. (in Russian)
11. Dudarchik V. M., Krayko V. M., Anufriyeva Ye. V. *Utilizatsiya nefteshlamov metodom piroliza s torfom* [Utilization of oil sludge by pyrolysis with peat]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 137–143. (in Russian)
12. Matveyev A. V., Kukharik Ye. A., Glaz A. S. *Rayonirovaniye territorii Tsentral'noy Belarusi po stepeni komfortnosti geologicheskoy sredy dlya zhiznedeystel'nosti naseleniya* [Zoning of the territory of Central Belarus according to the degree of comfort of the geological environment for the life of the population]. *Doklady NAN Belarusi = Reports of NAS of Belarus*, 2025, vol. 69, no 1, pp. 57–63. (in Russian)
13. Zhoglo V. G. *Podzemnyye vody Podlyassko-Brestskoy vpadiny: dinamika, resursy, ekologiya* [Groundwater of the Podlasie-Brest Depression: Dynamics, Resources, Ecology]. Minsk, 2025, 155 p. (in Russian)
14. Lukashov O. V. *Zakonomernosti akkumulyatsii metallov v sovremennykh donnykh otlozheniyakh r. Svisloch'*. *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Problemy regional'noy geologii zapada Vostochno-Yevropeyskoy platformy i smezhnykh territoriy"* [Materials of the III International Scientific Conference "Patterns of metal accumulation in modern bottom sediments of the Svisloch River"]. Minsk, 2021, pp. 238–267. (in Russian)
15. Avtushko M. I., Matveyev A. V., Isachenko S. A. *Novyye dannyye o postuplenii radona v sredu obitaniya cheloveka* [New data on the entry of radon into the human environment]. *Doklady NAN Belarusi = Reports of NAS of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 3, pp. 355–360. (in Russian)

16. Matveyev A. V., Rylova T. B., Shidlovskaya A. V. *Muravinskoye mezhdlednikov'ye na territorii Belorusskogo Poles'ya* [Muravinsky interglacial on the territory of the Belarusian Polesie]. Minsk, 2024, 197 p. (in Russian)
17. Zernitskaya V. P. *Pozdnelednikov'ye i golotsen Belarusi: geokhronologiya, osadkonakopleniye, rastitel'nost' i klimat* [Late Glacial Period and Holocene of Belarus: Geochronology, Sedimentation, Vegetation, and Climate]. Minsk, 2022, 303 p. (in Russian)
18. Loginov V. F. *Sovremennyye izmeneniya klimata* [Modern climate changes]. Saint Petersburg, 2024, 267 p. (in Russian)
19. Lysenko S. A. *Stsenarnyye prognozy izmeneniya klimata Belarusi na osnove regional'no optimizirovannykh ansambley gidrodinamicheskikh modeley proyekta CMIP6* [Scenario forecasts of climate change in Belarus based on regionally optimized ensembles of hydrodynamic models of the CMIP6 project]. *Meteorologiya i gidrologiya* = Meteorology and Hydrology, 2025, no. 7, pp. 65–79. (in Russian)
20. Pugachevskiy A. V. *Differentsiatsiya i rayonirovaniye territorii Belarusi po kharakteru reaktsii khvoynykh lesov na izmeneniye klimata* [Differentiation and zoning of the territory of Belarus based on the nature of the reaction of coniferous forests to climate change]. *Formirovaniye vysokoproduktivnykh i biologicheskii ustoy-chivnykh lesnykh nasazhdeniy v usloviyakh menyayushchegosya klimata: sovremennoye sostoyaniye i puti resheniya : materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Formation of highly productive and biologically sustainable forest plantations in a changing climate: current state and solutions: Proc. Int. scientific conf.]. Gomel, 2024, pp. 139–143. (in Russian)
21. Matyushevskaya Ye. V. *Yel' i sosna v ekologicheskii napryazhennykh lesnykh landshaftakh Belarusi* [Spruce and pine in ecologically stressed forest landscapes of Belarus]. Minsk, 2021, 191 p. (in Russian)
22. Mel'nik V. I., Lysenko S. A., Brovka Yu. A., Khitrikov M. A., Buyakov I. V. *Novoye agroklimaticheskoye rayonirovaniye i otsenka agroklimaticheskikh resursov territorii Belarusi za 2000–2022 gg.* [New agroclimatic zoning and assessment of agroclimatic resources of the territory of Belarus for 2000–2022]. *Prirodnye resursy* = Natural Resources, 2025, no. 1, pp. 5–21. (in Russian)
23. Sidak S. V., Volchak A. A., Parfomuk S. I., Kofanov V. A. Regularities of variability in average monthly flow rates during the low-water period in the rivers of Belarus. *Vestnik of Brest State Technical University*, 2023, no. 3 (132), pp. 78–82.
24. Volchek A. A., Okoronko I. V. *Landshaftno-ekologicheskoye sostoyaniye rechnykh basseynov zapadnoy chasti polesskoy provintsii* [Landscape and ecological state of river basins in the western part of the Polesie province]. Moscow, 2025, 172 p. (in Russian)
25. Sukhovilo N. Yu. *Teplovoy rezhim ozera Lukomskoye v usloviyakh klimaticheskikh izmeneniy i teplovogo zagryazneniya* [Thermal regime of Lake Lukomskoye under conditions of climate change and thermal pollution]. *Geografiya* = Geography, 2023, no. 1, pp. 20–27. (in Russian)
26. Zernitskaya V. P., Vlasov B. P., Kukharik Ye. A., Sukhovilo N. Yu., Kukharik A. M. *O sovremennom sostoyanii issledovaniy gazovogo sostava vod i donnykh otlozheniy ozer* [On the current state of research into the gas composition of waters and bottom sediments of lakes]. *Vestnik Brestskaya universiteta = Bulletin of the Brest University. Series 5, Biology. Science from the Land*, 2025, no 2, pp. 110–124. (in Russian)
27. Kolbas A. P., Kolbas N. Yu., Nesteruk V. S., Mikhal'chuk N. V. *Otsenka aeral'nogo zagryazneniya potentsial'no toksichnymi elementami impaktnykh zon metodom mokhovykh lovushek* [Assessment of aerial pollution by potentially toxic elements of impact zones using the moss trap method]. *Vestnik Brestskaya universiteta = Bulletin of the Brest University. Series 5: Biology. Science from the Land*, 2025, no 2, pp. 125–135. (in Russian)
28. Nikolaychuk A. M., Yakovlev A. P., Vashkevich M. N., Zhdanets S. F. *Agrokhimicheskaya kharakteristika pochvy lesnykh ekosistem vokrug tsementnykh proizvodstv Respubliki Belarus'* [Agrochemical characteristics of the soil of forest ecosystems around cement production facilities in the Republic of Belarus]. *Vestnik Vitebskaya dzyarzhavnaya univertsiteta = Bulletin of the Vitebsk State University*, 2023, no. 1 (118), pp. 46–51. (in Russian)
29. Agutin K. A., Brovka G. P., Dedyulya I. V. *Ustanovki i metodiki issledovaniya kharakteristik massoperenosa i pucheniya pri promerzanii gruntov* [Installations and methods for studying the characteristics of mass transfer and heaving during soil freezing]. *Prirodopol'zovanie* = Nature Management, 2025, no. 1, pp. 148–159. (in Russian)
30. Pastukhova M. A., Shelyuto B. V. *Gradatsiya travyanykh kormov Brestskoy oblasti po sodержaniyu tsinka* [Gradation of grass forages in the Brest region by zinc content]. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii = Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*, 2025, no. 2, pp. 111–115. (in Russian)
31. Neverov A. V., Masilevich N. A., Ravino A. V. *Natsional'nyye indykatory vosproizvodstva prirodnogo kapitala* [National indicators of reproduction of natural capital]. *Trudy Belorusskoy gosudarstvennoy tekhnicheskoy universiteta = Proceedings of the Belarusian State Technical University. Series 5. Economics and Management*, 2023, no. 1 (268), pp. 31–40. (in Russian)
32. Chervan' A. N., Tsybul'ko N. N., Yatsukhno V. M. *Metodicheskiye podkhody i prakticheskoye primeneniye rezul'tatov otsenki degradatsii zemel'/pochv Belarusi* [Methodological approaches and practical application of the results of land/soil degradation assessment in Belarus]. *Izvestiya RAN = Bulletin of the RAS. Geographical series*, vol. 86, no. 1, 2022, pp. 55–68. (in Russian)
33. Ratnikova O. N., Rakovich V. A., Yarmoshuk T. D., Lisitsyna I. P., Borsh A. T. *Stadii povtornogo zabolachivaniya na vyrabotannom uchastke torfyannogo mestorozhdeniya nizinnogo tipa Ivanovskoye* [Stages of re-wetting in a mined-out area of the Ivanovskoye lowland peat deposit]. *Vestnik Polotskoy gosudarstvennoy universiteta = Bulletin of the Polotsk State University. Series F, Construction. Applied Sciences*, 2025, no. 1(40), pp. 58–66. (in Russian)

34. Kuz'min S., Davydik Ye., Sazonov A. *Issledovaniye kul'turnogo landshafta kak ob'yekta prirodnogo i istoriko-kul'turnogo naslediya v kontekste ustoychivogo razvitiya territoriy (na primere Braslavskego regiona Respubliki Belarus')* [Study of the cultural landscape as an object of natural and historical-cultural heritage in the context of sustainable development of territories (on the example of the Braslav region of the Republic of Belarus)]. *Vestnik Oshskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Osh State University. Chemistry. Biology. Geography*, 2025, no. 1 (6), pp. 112–141. (in Russian)
35. Yermolina I. V. *Metodicheskiye osnovy sotsial'no-ekologo-ekonomicheskoy otsenki turisticheskogo potentsiala lesnogo fonda leskhozov dlya razvitiya ekologicheskogo turizma* [Methodological foundations of the socio-ecological-economic assessment of the tourism potential of the forest fund of forestries for the development of ecological tourism]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo = Bulletin of the P. O. Sukhoi Gomel State Technical University*, 2022, no. 1, pp. 98–108. (in Russian)
36. Kurzo B. V., Kuntsevich V. B., Gaydukevich O. M., Tatkov A. Yu., Molochko A. A., Makarenko T. I., Ageychik I. V., Kalilets L. P. *Eksperimental'nyye issledovaniya tekhnologii skvazhinnoy gidrodobychi sapropelya iz-pod torfa* [Experimental studies of the technology of borehole hydraulic extraction of sapropel from under peat]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 138–147. (in Russian)
37. Tomson A. E., Sokolova T. V., Tsaryuk T. Ya., Marzan A. S., Falyushina I. P., Anufriyeva Ye. V., Pekhtereva V. S., Kalantarov M. G. *Vliyaniye modifitsiruyushchikh dobavok na formirovaniye poristoy struktury torfyanogo koksa* [The influence of modifying additives on the formation of the porous structure of peat coke]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 198–205. (in Russian)
38. Zhmakova N. A., Makarova N. L., Semenchukova Ye. A., Muratova A. A. *Antimikrobnaya aktivnost' preparatov iz sfagnovogo torfa i sfagnovogo msha s mikroelementami* [Antimicrobial activity of preparations from sphagnum peat and sphagnum moss with microelements]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 146–155. (in Russian)
39. Annaev N. A., Levanskij A. É., Nurmuhamedov H. S., Sultanov Ž. V., Nurmuhamedov S. H., Fedarovich E. G. *Éffektivnoe izmel'chenie tverdogo topliva v turbulizirovannom sloe* [Efficient crushing of solid fuel in turbulent bed]. *Universum: tekhnicheskie nauki = Universum: Technical Sciences*, 2024, no. 7 (124), pp. 29–38. (in Russian)
40. Rod'kin O. I., Zelenukho Ye. V., Glukhovskiy V. I., Laptinok S. A. *Ekologo-tekhnologicheskiye aspekty ispol'zovaniya mestnykh vidov topliva na osnove biomassy v energeticheskikh tselyakh* [Ecological and technological aspects of the use of local types of biomass-based fuel for energy purposes]. *Nauchnyye gorizonty : mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal = Scientific Horizons: International Scientific Journal*, 2024, no. 7 (83), pp. 72–86. (in Russian)
41. Shelonik M. A., Yanuta Yu. G. *Fitotoksicheskiye svoystva ful'vopodobnykh soyedineniy torfa* [Phytotoxic properties of fulvic-like compounds of peat]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 196–202. (in Russian)

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, директор, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Камышенко Галина Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, ученый секретарь, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kamysHENka1@yandex.by

Information about the authors

Sergey A. Lysenko – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor, Director, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Halina A. KamysHENka – Ph. D. (Technical), Associate professor, Scientific Secretary, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kamysHENka1@yandex.by

МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТИПОВ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ПО Б. Л. ДЗЕРДЗЕЕВСКОМУ И ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА

В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрены многолетние изменения типов циркуляции атмосферы по Б. Л. Дзердзеевскому во внетропической зоне Северного полушария и их связь с глобальным климатом. Проанализирован характер изменений каждой из четырёх групп циркуляции по Б. Л. Дзердзеевскому за период с 1899 по 2019 г. Показано, что долговременные проявления изменений продолжительности групп атмосферной циркуляции в термическом режиме отличаются нестабильностью. На основе статистического анализа проведены оценки связей продолжительностей агрегированных групп циркуляции с глобальной температурой и аномалиями приземного давления по секторам и широтным поясам Северного полушария в периоды доминирования различных групп циркуляции, рассмотрены вопросы возможного взаимодействия циркуляции различных типов с паузой в изменении температуры Северного полушария в период 1998–2013 гг.

Рассмотрены изменения аэрозольно-газового состава атмосферы как доминирующего фактора в изменении глобального климата. Дисбаланс энергии в климатической системе в нынешнем столетии может быть также связан с изменением процессов крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы.

Для цитирования. Логинов В. Ф., Микуцкий В. С. Многолетние изменения типов атмосферной циркуляции по Б. Л. Дзердзеевскому и глобального климата // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 30–39.

LONG-TERM CHANGES IN ATMOSPHERIC CIRCULATION TYPES BY B. L. DZERDZEEVSKII AND GLOBAL CLIMATE SYSTEM

V. F. Loginov, V. S. Mikutsky

Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. Long-term changes in atmospheric circulation patterns by B. L. Dzerdzeevskii in the extratropical zone of the Northern Hemisphere and their relationship to global climate were examined. The nature of changes in each of the four circulation groups according to B. L. Dzerdzeevskii for the period from 1899 to 2019 was analyzed. It has been shown that long-term manifestations of changes in the duration of atmospheric circulation groups in the thermal regime are unstable. Based on statistical analysis, the relationships between the durations of aggregated circulation groups and global temperature and surface pressure anomalies in the sectors and latitudinal zones of the Northern Hemisphere during periods of dominance of different circulation groups have been evaluated. The article also examines the possible interaction between different types of circulation and the pause in temperature changes in the Northern Hemisphere during 1998–2013.

Changes in the aerosol-gas composition of the atmosphere as a dominant factor in global climate change are considered. The energy imbalance in the climate system in the current century may also be related to changes in the processes of large-scale ocean-atmosphere interactions.

Keywords: atmospheric circulation; elementary circulation mechanism (ECM); classification by B. L. Dzerdzeevskii; atmospheric processes.

For citation. Loginov V. F., Mikutsky V. S. Long-term changes in atmospheric circulation types by B. L. Dzerdzeevskii and global climate system. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 30–39.

Введение. Для характеристики циркуляции атмосферы существует ряд классификаций (типизаций) и индексаций атмосферных процессов, в основе которых лежат характеристики барического поля, определяющие скорость и направление горизонтального и вертикального движения атмосферного воздуха.

Увеличение количества классов (типов) атмосферных процессов приводит к устранению важного преимущества классификаций (типизаций) – универсальности. Удачное соотношение общего и частного в нужных пропорциях найдено в классификации Б. Л. Дзердзеевского [1], что обеспечило её широкое

распространение в климатических исследованиях. Ученым выделены 13 типов (с 41 подтипом) и четыре образуемые ими обобщённые группы циркуляции для шести секторов Северного полушария. Это делает данную типизацию менее общей по сравнению с типизацией Г. Я. Вангенгейма – А. А. Гирса [2], в которой все многообразие процессов авторы объединили в 26 типах, а затем эти типы обобщили в три формы: западную W, восточную E и меридиональную C. Последние определяли по преобладающим переносам тропосферных воздушных масс в умеренных широтах Северного полушария.

Типизация Б. Л. Дзердзеевского основана на обмене массами атмосферного воздуха между северными и южными широтами, а не на переносе воздушных масс в умеренных широтах. Собственно поэтому в понятие меридиональной и зональной циркуляции в типизации Б. Л. Дзердзеевского заложен другой смысл, чем в понятие меридиональной и западной формы циркуляции в типизации Г. Я. Вангенгейма – А. А. Гирса.

Цели, материалы и методика исследований. В работе исследованы связи между изменениями циркуляции атмосферы и термическим режимом Северного полушария с целью оценки роли различных типов циркуляции атмосферы в формировании современных климатических изменений. Используемая нами типизация циркуляции атмосферы Северного полушария создавалась Б. Л. Дзердзеевским с соавторами как инструмент для анализа многолетних колебаний климата и климатического прогноза. Они свели все многообразие циклонической циркуляции в Северном полушарии к некоторому количеству характерных типов (ситуаций) [1, 2], названных элементарными циркуляционными механизмами (ЭЦМ). В атмосферных процессах, представляющих собой аналог крупномасштабной турбулентности, выражающейся в характерном взаимном расположении циклонов и антициклонов, ЭЦМ выступают как основные единицы типизации атмосферной циркуляции. Закономерности в их повторяемости, переходах от одного типа к другому позволили авторам построить классификацию синоптических процессов во внетропической зоне Северного полушария. В последние десятилетия исследования школы Б. Л. Дзердзеевского продолжались её представителем Н. К. Кононовой, которая успешно развивала и поддерживала разработанную более 70 лет тому назад классификацию атмосферных процессов в Северном полушарии до 2019 г. [3, 4]. Сформированные ею ряды продолжительностей ЭЦМ и групп ЭЦМ для Северного полушария за период 1899–2019 гг. [5] были использованы нами для анализа связей продолжительностей агрегированных групп ЭЦМ с глобальной температурой и аномалиями приземного давления по секторам и широтным поясам Северного полушария в периоды доминирования различных групп меридиональной циркуляции. Рассмотрены также вопросы возможного взаимодействия циркуляции различных типов с паузой в изменении температуры Северного полушария в период с 1998 по 2013 г.

При обработке данных результаты сравнительного анализа объективизировались такими статистическими методами обработки данных, как корреляционный, регрессионный и спектральный анализы.

Результаты и их обсуждение. Дадим краткую характеристику изменений каждой из четырёх групп циркуляции атмосферы.

Меридиональная северная (ЭЦМ 8–12) связана с арктическими вторжениями масс арктического воздуха в средние широты, а меридиональная южная (ЭЦМ 13з и 13л) – с выходом южных циклонов.

Зональная циркуляция и нарушение зональности были особенно выражены в период, начиная с 1920-х годов до конца 1950-х – начала 1960-х годов, затем они сменились двумя положительными флюктуациями меридиональной северной группы (середина 1960-х – начало 1980-х годов). Минимум меридиональной северной группы циркуляции в эти десятилетия пришёлся на конец 1980-х – 1990-е годы.

Кардинальные изменения в характере общей циркуляции в Северном полушарии состояли в резком увеличении числа случаев меридиональной южной группы циркуляции атмосферы: в отдельные годы в конце 1980 – 90-х годах оно составляло от 150 дней в году и более.

Быстрый рост годовой повторяемости случаев меридиональной южной группы циркуляции продолжался до начала 1990-х годов и, несмотря на последующее её падение вплоть до начала 2010-х годов, она оставались выше нормы в течение около четверти века. Это упомянутое выше короткопериодное снижение повторяемости числа дней ЭЦМ 13 сменилось её последующим повторным быстрым ростом с начала 2010-х годов. Такое беспрецедентное увеличение повторяемости числа случаев меридиональной южной группы циркуляции явилось наиболее выдающейся особенностью атмосферной циркуляции в Северном полушарии с середины 1980-х годов.

Если сравнить период 1984–2019 гг. с другими периодами такой же длительности, то повторяемость числа дней с ЭЦМ 13 в период с 1984–2019 гг. была больше, чем в периоды 1948–1983 и 1912–1947 гг. в 2,5 и почти 8,0 раза соответственно.

Это означает, что ключевую роль в климатических процессах в Северном полушарии в эти годы могло сыграть увеличение повторяемости меридиональной южной циркуляции.

Из выделенных Б. Л. Дзердзеевским четырёх групп циркуляции меридиональная северная группа циркуляции является единственной группой, для которой среднегодовая повторяемость числа

дней за доступный период наблюдений (1899–2019 гг.) превышает полгода и составляет 197 дней. Второй по среднегодовой повторяемости числа дней за последние десятилетия является меридиональная южная группа циркуляции атмосферы. Повторяемость числа дней этой группы отличается сильной контрастностью за доступный период наблюдений. Если в первый шестидесятилетний период средняя повторяемость числа дней не превышала 10 дней в году, то в период с 1964 по 2019 г. (данными за последний пятилетний период мы не располагаем) составила 95 дней.

Наименьшая среднегодовая повторяемость числа дней характерна для зональной группы циркуляции, особенно для периода с 1993 по 2019 г., когда она составила менее 10 дней в год. Среднегодовая повторяемость числа дней для группы циркуляции нарушения зональности для первого шестидесятилетнего периода (1899–1959 гг.) составляет 120 дней, тогда как с 1987 г. она существенно уменьшалась и в период с 1987 по 2019 г. составила около 40 дней.

При изменении среднегодовой повторяемости числа дней для зональной группы и группы нарушения зональности характерно существенное уменьшение среднегодовой повторяемости числа дней в последний 30–35-летний период.

Многолетние изменения среднегодовых значений показателей четырёх групп циркуляции по Б. Л. Дзердзеевскому даны на рис. 1, а их спектры (значения периодограммы) представлены на рис. 2.

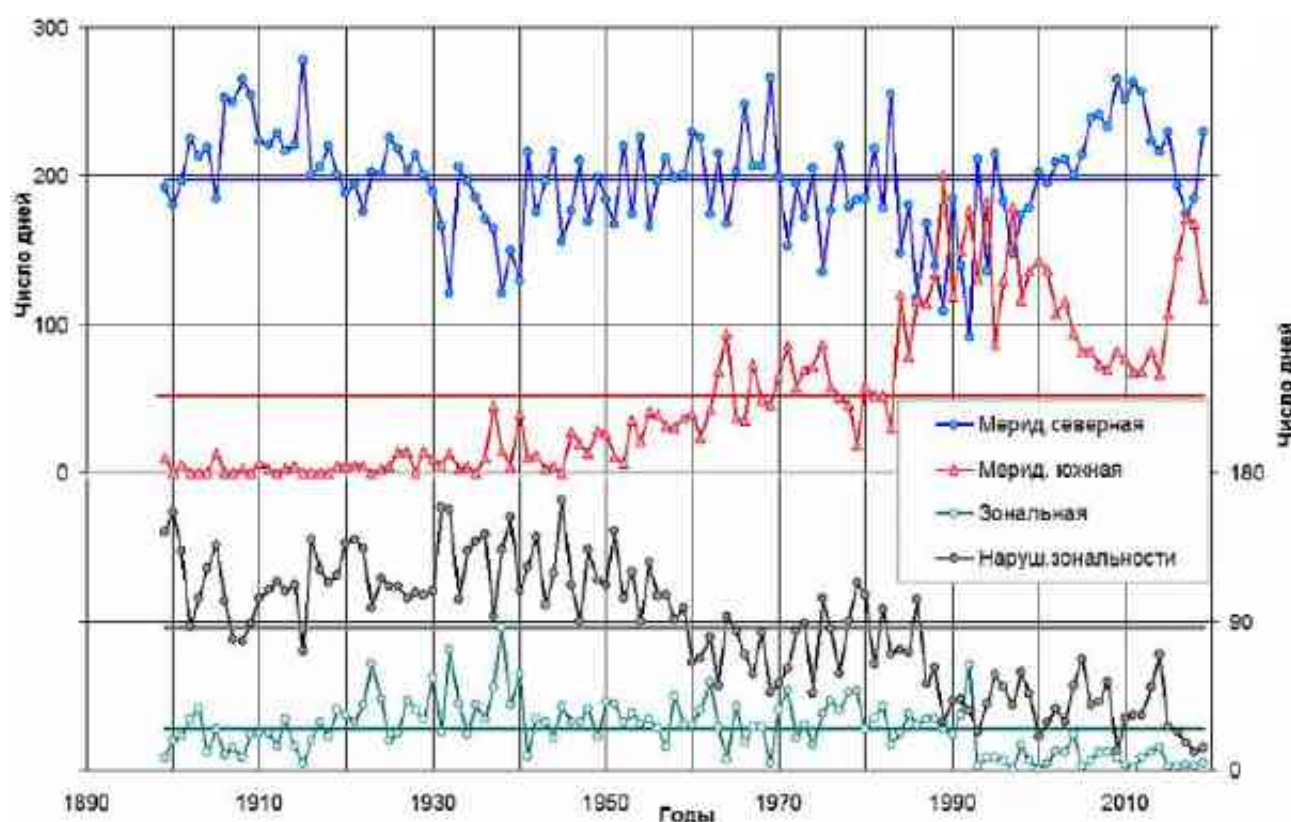


Рис. 1. Многолетние колебания суммарной годовой продолжительности групп общей циркуляции атмосферы по Б. Л. Дзердзеевскому за 1899–2019 гг.
Левая шкала: меридиональная северная и меридиональная южная;
правая шкала: зональная и нарушения зональности

Fig. 1. Long-term variations in the total annual duration of atmospheric general circulation groups according to B. L. Dzerdzeevskii for 1899–2019.
Left scale: meridional northern and meridional southern circulation groups;
right scale: zonal and zonality disturbance circulation groups

В спектре меридиональной северной группы циркуляции отчетливо выражен квазишестидесятилетний цикл, а в спектре меридиональной южной циркуляции – квазитридцатилетний цикл. Известно, что квазишестидесятилетняя цикличность характерна для Атлантической квазимультидекадной осцилляции.

Анализ многолетних изменений среднегодовой повторяемости числа дней отдельных групп циркуляции по Б. Л. Дзердзеевскому позволил выявить ряд их существенных особенностей. Одной из таких

особенностей является антикорреляция в изменении среднегодовой повторяемости числа дней меридиональной южной группы циркуляции и группы нарушения зональности (рис. 3). Коэффициент корреляции (r) среднегодовой повторяемости числа дней меридиональной южной и нарушения зональности составил $-0,7$. Вероятность случайности подобной тесноты связей составляет менее 1 %.

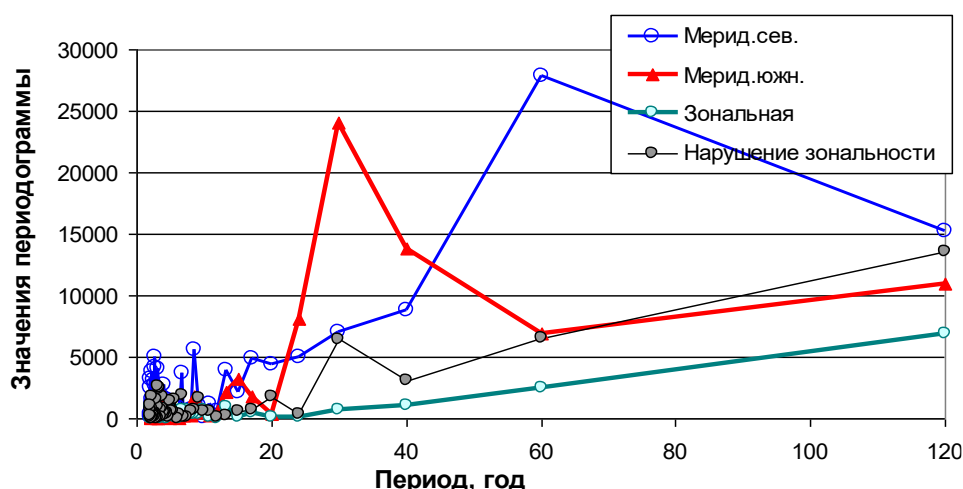


Рис. 2. Спектры (значения периодограммы) среднегодовых значений показателей общей циркуляции атмосферы по группам: меридиональная северная (ЭЦМ 8а–12г), меридиональная южная (ЭЦМ 13), зональная (ЭЦМ 1–2); нарушения зональности (ЭЦМ 3–7)

Fig. 2. Spectra (periodogram values) of the average annual values of the general atmospheric circulation indicators for groups: meridional northern circulation group (ECM 8a–12d), meridional southern (ECM 13), zonal (ECM 1–2); zonality disturbance (ECM 3–7)

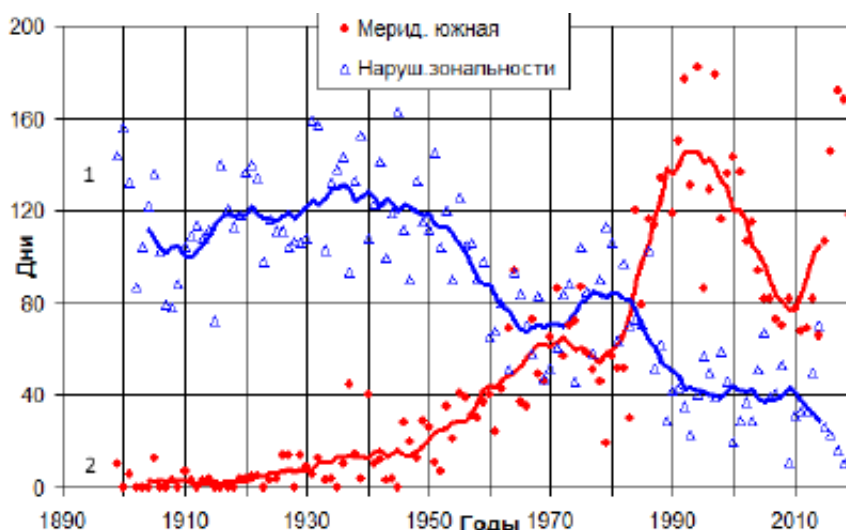


Рис. 3. Многолетние колебания суммарной годовой продолжительности группы нарушения зональности (ЭЦМ 3–7) (1) и меридиональной южной группы циркуляции (ЭЦМ 13) (2) атмосферы по Б. Л. Дзердзеевскому за 1899–2019 гг. Сплошные линии – 11-летние скользящие средние

Fig. 3. Long-term fluctuations in the total annual duration of the zonality disturbance group (ECM 3–7) (1) and the meridional southern circulation group (ECM 13) (2) of the atmosphere according to B. L. Dzerdzeevskii for the period 1899–2019. Solid lines represent 11-year moving averages

Разность суммарной годовой продолжительности меридиональной южной группы циркуляции и группы нарушения зональности обнаруживают тесную отрицательную связь с температурой Земного шара (рис. 4).

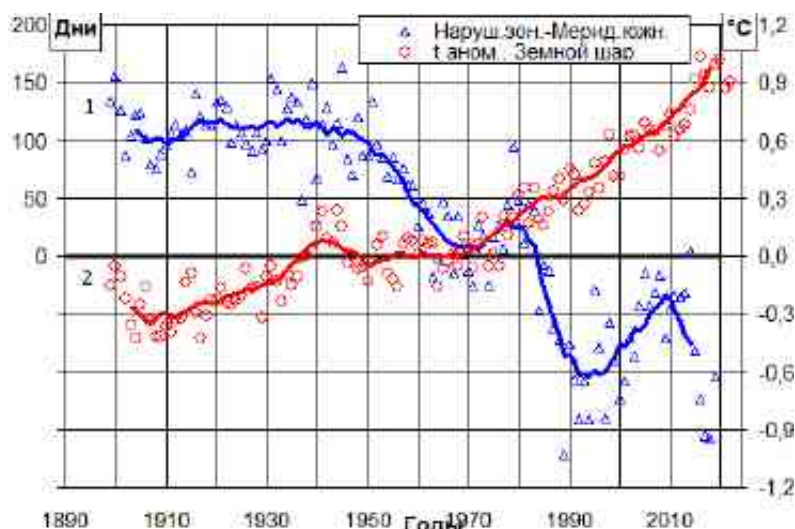


Рис. 4. Связь изменений разностей суммарной годовой продолжительности меридиональной южной группы циркуляции и группы нарушения зональности циркуляции атмосферы (1) с аномалиями температуры земного шара (базовый период 1901–2000 гг.) (2). Сплошные линии – 11-летние скользящие средние

Fig. 4. Relationship between changes in the differences in the total annual duration of the meridional southern circulation group and the atmospheric circulation zonality disturbance group (1) and global temperature anomalies (base period 1901–2000) (2). Solid lines represent 11-year moving averages

Подобная по тесноте связь имеет место в случае, если с температурой Земного шара, Северного и Южного полушарий коррелируется разность меридиональной южной группы циркуляции и агрегированной группы (нарушение зональности + зональная циркуляция). Для любых других сочетаний коэффициенты корреляции сопоставляемых характеристик существенно ниже. Исключение составляет разность продолжительностей меридиональной северной и меридиональной южной групп.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов корреляции разностей суммарных годовых продолжительностей меридиональной южной группы циркуляции и группы нарушения зональности с температурой Земного шара, Северного и Южного полушарий для двух периодов.

Таблица 1. Значения коэффициентов корреляции разностей годовых продолжительностей южной группы циркуляции и группы нарушения зональности с температурой Земного шара, Северного и Южного полушарий для разных временных периодов

Table 1. Correlation coefficient values for the differences in the annual durations of the southern circulation group and the zonality disturbance group with the temperature of the Globe, the Northern and Southern Hemispheres for different time periods

Годы	Земной шар	Северное полушарие	Южное полушарие
1899–1994	–0,63	–0,51	–0,60
1899–2019	–0,78	–0,79	–0,81

Как видно из табл. 1 теснота связи сопоставляемых характеристик увеличивается с увеличением числа лет выборки (для всего доступного ряда она выше); большая положительная разность числа дней агрегированной группы циркуляции меридиональной южной и нарушения зональности отвечает большей величине скорости увеличения температуры Земного шара, Северного и Южного полушарий.

Нами были проанализированы аномалии приземного давления по секторам и широтным поясам Северного полушария для двух временных периодов, в которые доминировали меридиональная южная группа циркуляции (1987–1994 гг.) и меридиональная северная группа циркуляции (2007–2014 гг.).

При доминировании южной группы циркуляции атмосферы отрицательные аномалии давления чаще отмечались в широтных поясах, включающих всю акваторию Северного Ледовитого океана (62,5°...90° с. ш.). Такое распределение давления типично для упрощённой схемы, представленной на рис. 5, когда тепло поступает из низких широт к высоким и в средних и высоких широтах Северного полушария развивается потепление. Как правило, такое распределение давления, как показано в нашей работе [6], характерно для тёплых лет. Их повторяемость существенно возросла в последние 30–40 лет [6].

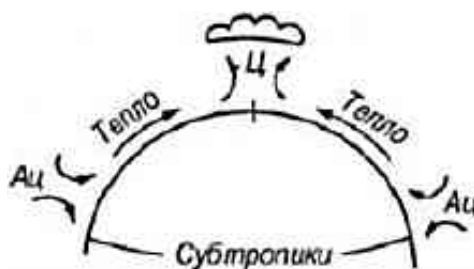


Рис. 5. Схема планетарной циркуляции с циклонической циркуляцией над полюсом

Fig. 5. Planetary circulation pattern with cyclonic circulation over the pole

Если процесс увеличения повторяемости меридиональной южной группы циркуляции продолжится, следует ожидать дальнейшего роста глобальной температуры, вызванной увеличением числа выходов южных циклонов и снижением давления в высоких широтах Земного шара, т. е. более частой повторяемости во времени схемы планетарной циркуляции с циклонической циркуляцией над полюсом.

Принимая во внимание максимальное среднегодовое число дней для меридиональной северной группы циркуляции (197 дней в году) по сравнению с другими тремя группами циркуляции, рассмотрим связь этой группы циркуляции с аномалиями температуры Земного шара, Северного и Южного полушарий за период с 1899 по 2019 г. Для периода с 1899 г. до середины 1990-х годов обнаруживается обратная связь термического режима Земного шара, Северного и Южного полушарий с числом дней меридиональной северной группы циркуляции атмосферы по Б. Л. Дзердзеевскому (рис. 6).

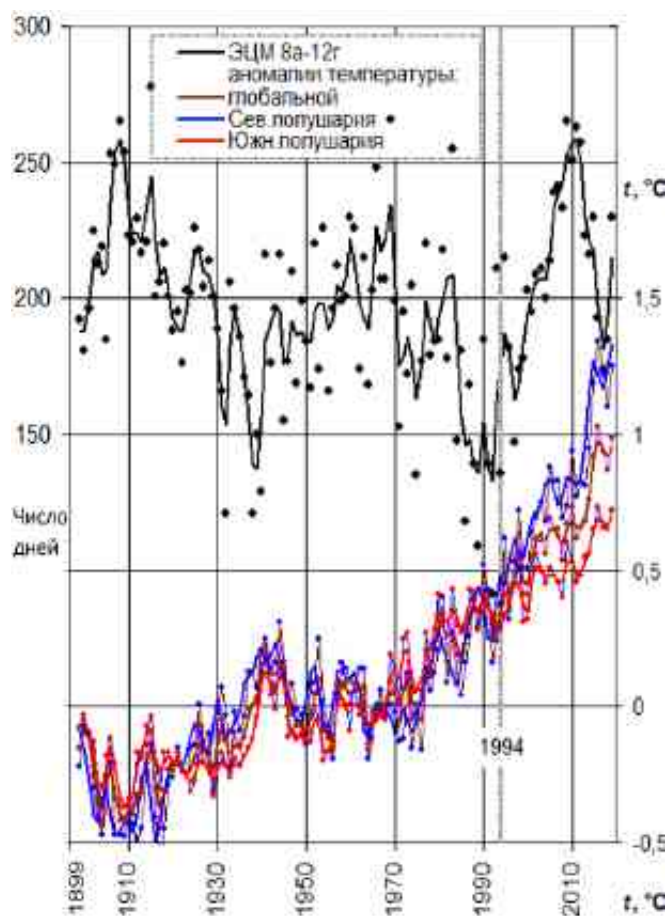


Рис. 6. Связь меридиональной северной группы циркуляции (ЭЦМ 8а–12г) с аномалиями температуры Земного шара, Северного и Южного полушарий, 1899–2019 гг.

Fig. 6. Relationship of the meridional northern circulation group (ECM 8a–12d) with anomalies of the Globe temperature, Northern and Southern Hemisphere, 1899–2019

Значения коэффициентов корреляции меридиональной северной группы циркуляции с аномалиями температуры Земного шара, Северного и Южного полушарий приведены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции меридиональной северной группы циркуляции с аномалиями температуры Земного шара, Северного и Южного полушарий

Table 2. Correlation coefficients of the meridional northern circulation group with temperature anomalies of the Global, Northern and Southern Hemispheres

Годы	Земной шар	Северное полушарие	Южное полушарие
1899–1994	–0,34	–0,41	–0,34
1899–2019	0,00	0,01	–0,02

Полученные коэффициенты корреляции для периода 1899–1994 гг. оказались во всех случаях статистически значимыми на уровне $P_{\text{случ.}} < 1\%$. Однако связь меридиональной северной группы циркуляции и аномалий температуры Земного шара, Северного и Южного полушарий оказалась устойчивой только до 1990-х годов. В конце прошлого столетия теснота связи стала падать. В последнее десятилетие она слабо положительная, что может свидетельствовать о радикальных событиях, произошедших в климатической системе в середине 1990-х годов.

Оценки связей аномалий температуры Земного шара, Северного и Южного полушарий с меридиональной южной циркуляцией и группой циркуляции нарушения зональности оказались особенно тесными. Так, коэффициенты корреляции аномалий температуры Земного шара, Северного и Южного полушарий с меридиональной южной циркуляцией оказались +0,74; +0,69; +0,78, а с группой нарушения зональности –0,73; –0,68; –0,75 соответственно. Разный знак связей сопоставляемых характеристик определяется наличием установленной выше обратной связи многолетних изменений повторяемости числа дней, входящих в указанные группы циркуляции атмосферы.

Отметим, однако, что полученным тесным связям сопоставляемых характеристик не следует придавать большого значения, поскольку они определяются наличием в рядах групп циркуляции мощных трендовых составляющих – положительного тренда для меридиональной южной группы циркуляции и отрицательного тренда для группы циркуляции нарушения зональности.

Учитывая тесные внутрирядные связи повторяемости членов выборки указанных типов циркуляции, эффективное число членов ряда становится минимальным, и статистическая значимость коэффициентов корреляции не подтверждается.

Таким образом, использование такой характеристики, как меридиональная северная группа циркуляции, при дальнейших исследованиях причинно-следственных связей макроциркуляции атмосферы с термическим режимом различных регионов земного шара является предпочтительным не только в силу приведённого аргумента, но и по другим причинам. С одной стороны, эта группа циркуляции характеризует такой важнейший параметр циркуляции атмосферы, как интенсификация обмена воздушных масс высоких и умеренных широт (арктические вторжения). С другой стороны, число дней меридиональной северной группы циркуляции намного превышает многолетнюю повторяемость числа дней всех других групп циркуляции – нарушения зональности, меридиональной южной и зональной – в 2,2; 4,1; 8,0 раза соответственно. Исключение составляет период с 1984 по 2019 г., когда отношение числа дней меридиональной северной и меридиональной южной циркуляции близко к двукратному.

Особый интерес в изменении температуры Северного полушария представляет появление паузы в изменении температуры в период с 1998 по 2013 г., когда скорость роста температуры Северного полушария существенно замедлилась. Пауза была особо выражена зимой, когда коэффициенты линейного тренда были близки к нулю: декабрь – $\alpha = 0,002$; январь – $\alpha = 0,006$. В феврале коэффициент линейного тренда даже был отрицательным: $\alpha = -0,037$. Природа этой паузы в изменении температуры обсуждалась в многочисленных работах; их обзор можно найти в наших последних работах [7–9]. Пауза пришлась на небольшую часть периода активного доминирования меридиональной Южной группы циркуляции ЭЦМ 13 в период 1984–2019 гг. Начиная с 1998 г. и вплоть до 2014 г. происходило значительное уменьшение числа дней с ЭЦМ 13з, затем они приблизились к норме, а с 2015 г. начался стремительный рост их числа. В тёплое время года снижение числа дней ЭЦМ 13л наступило и закончилось несколькими годами позже.

Пауза в изменении температуры Северного полушария зимой также совпала с периодом интенсивного роста повторяемости меридиональной северной группы циркуляции в 1998–2013 гг.

Однако соизмеримые изменения последней группы циркуляции происходили как в холодное, так и в тёплое время года, тогда как пауза в изменении температуры Северного полушария была отчётливой только зимой. Это означает, что причина формирования паузы в изменении температуры зимой носила более комплексный характер [7–9].

Заключение. Характер изменений каждой из четырёх групп циркуляции по Б. Л. Дзердзеевскому сводится к следующему. Первое слабое увеличение повторяемости меридиональной южной группы циркуляции произошло в 1960–70-е годы, а вторая, более выраженная фаза увеличения повторяемости, – в период с 1987 по 1994 г., т. е. до наступления паузы в изменении температуры Северного полушария. Первая фаза снижения повторяемости группы циркуляции нарушения зональности наступила во второй половине 1950-х годов, а вторая, более активная фаза, – в конце 1980-х годов и продолжалась более двух десятилетий. В последние два десятилетия произошло также активное снижение повторяемости числа дней зональной группы циркуляции.

Динамика указанных двух групп циркуляции оказалось противоположной динамике меридиональной южной группы циркуляции. Следует также отметить, что в последние десятилетия наметилась чёткая противофаза в изменении повторяемости меридиональной южной и меридиональной северной групп циркуляции. Принципиально важным для формирования потепления климата оказался радикальный рост повторяемости меридиональной южной группы циркуляции и выходов южных циклонов с восточной части Средиземного моря на Европейскую часть России и Беларусь с их последующим слиянием с атлантическими циклонами. Это означает, что увеличилась вероятность замены групп циркуляции зональной и нарушения зональности на меридиональную южную группу циркуляции и, как следствие, нарушения ранее существовавших связей общей циркуляции атмосферы и термического режима Земного шара. Указанные годы стали годами тесной обратной связи повторяемости меридиональной северной и меридиональной южной групп циркуляции, а также периодом роста температуры Земного шара, Северного и Южного полушарий.

Вышеизложенное свидетельствует, что в последние 30–40 лет произошли изменения характера атмосферной циркуляции по Б. Л. Дзердзеевскому, их согласованность с изменением термического режима Северного и Южного полушарий, а также Земного шара снизилась. Характер связи термического режима с наиболее повторяющейся группой циркуляции – меридиональной северной – претерпел радикальные изменения с середины 1990-х годов, что объясняется произошедшими в эти годы изменениями повторяемости других групп циркуляции атмосферы в это время.

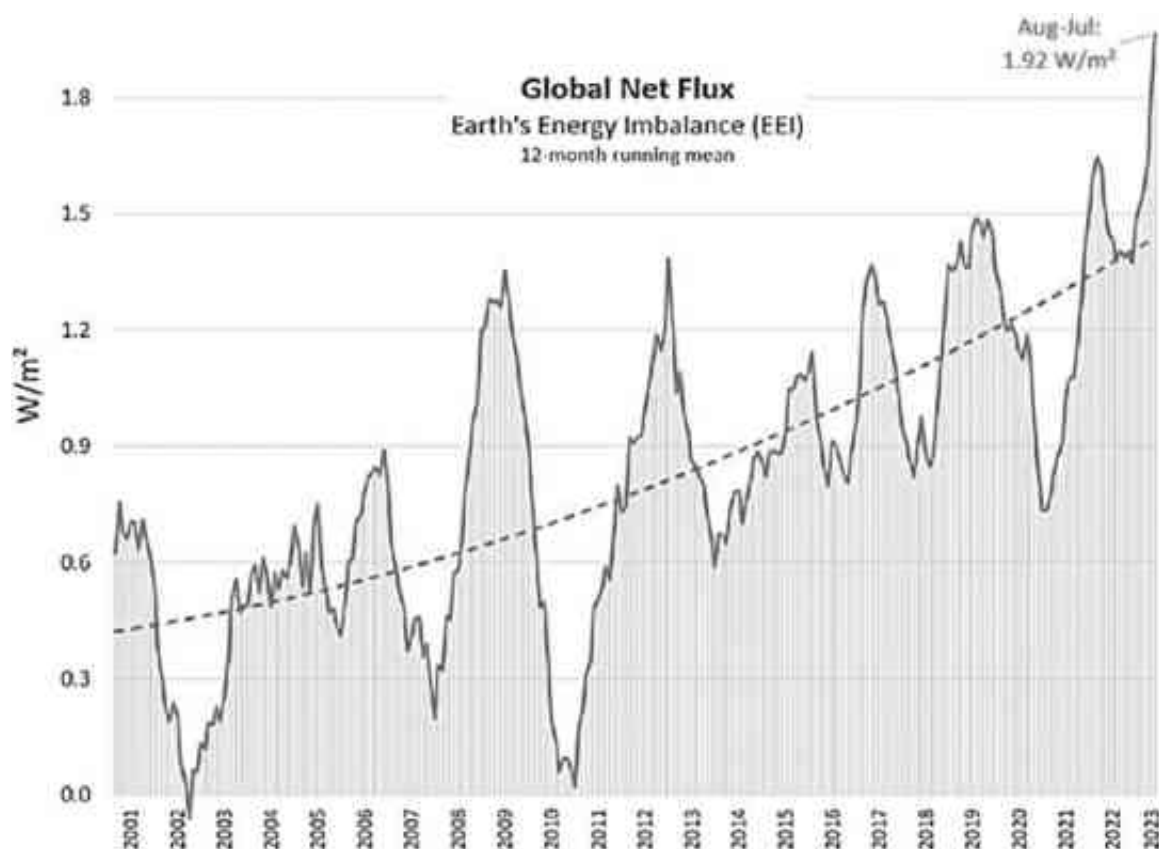


Рис. 7. Экспоненциальный рост дисбаланса энергии Земли (EEI – Earth Energy Imbalance), указывающий на разницу между проходящей солнечной радиацией и исходящей ото всех источников радиацией

Fig. 7. Exponential growth of the Earth Energy Imbalance (EEI) indicating difference between incoming solar radiation and outgoing radiation from all sources

Основная причина изменений характера связи термического и циркуляционного режимов, вероятно, связана с усилением роли радиационного фактора в изменении климата. Существенные изменения роли этого фактора происходили в последние годы в связи с ростом концентрации парниковых газов и очищением атмосферы от естественных (вулканических) и антропогенных аэрозолей. Содержание вулканических аэрозолей в атмосфере уменьшалось после последнего крупного извержения вулкана Пинатубо в 1991 г.

Известно, что эффект охлаждения атмосферы сульфатными антропогенными аэрозолями сдерживает потепление климата приблизительно на 0,5 °С. Очищение атмосферы от антропогенного и естественного (вулканогенного) аэрозоля в последние годы «разогнало» (усилило) потепление климата. Увеличение радиационного форсинга из-за снижения аэрозольного антропогенного загрязнения в Европе составило около 3,5 Вт/м² [6].

Влияние аэрозольного состава атмосферы на термический режим должно быть особенно заметным в тёплое время года. Оно стало проявляться в увеличении скорости потепления в последние два десятилетия в июле – октябре. Подобная ситуация наблюдалась во время предыдущего потепления климата Арктики в 1920–1945 гг. в июле – ноябре.

Подтверждением усиления доминирующей роли радиационного фактора в изменении климата является дисбаланс приходящей и уходящей в космическое пространство энергии (рис. 7) [10] (по данным [11]).

Как указывалось выше, он может быть связан как с ростом парниковых газов, так и с очищением атмосферы от аэрозолей естественного и антропогенного происхождения.

Другой причиной дисбаланса энергии в климатической системе в последнее двадцатилетие могло стать снижение функции Мирового океана в отведении тепла от подстилающей поверхности. Известно, что формирование глобального потепления в значительной степени обусловлено процессами крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы и регулируется системой отрицательных и положительных обратных связей в климатической системе. Главенствующая роль при этом принадлежит положительной связи между температурой воздуха и его влагосодержанием, а изменение последнего зависит преимущественно от компонентов вертикального обмена океана с атмосферой. Экспоненциальное увеличение дисбаланса энергии особенно заметно с конца прошлого столетия. Оно могло привести к непредвиденно большему увеличению скорости роста температуры и числа экстремальных погодных и климатических явлений.

Список использованных источников

1. Дзердзеевский, Б. Л. Типизация циркуляционных механизмов в Северном полушарии и характеристика синоптических сезонов / Б. Л. Дзердзеевский, В. М. Курганская, З. М. Витвицкая // Тр. науч.-исслед. учрежд. Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сер. 2, Синоптическая метеорология. – М. ; Л. : Гидрометеоиздат, 1946. – Вып. 21. – 80 с.
2. Гирс, А. А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов / А. А. Гирс. – Л. : Гидрометеоиздат, 1974. – 435 с.
3. Кононова, Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому / Н. К. Кононова. – М. : Ин-т географии РАН, 2009. – 370 с.
4. Кононова, Н. К. Динамика циркуляции атмосферы и циркуляционные механизмы метеорологических экстремумов в Арктике / Н. К. Кононова // Известия РАН. Серия географическая. – 2007. – № 6. – С. 26–42.
5. Колебания циркуляции атмосферы северного полушария в XX – начале XXI века. – URL: <https://atmospheric-circulation.ru/datas/> (дата обращения: 28.04.2026).
6. Логинов, В. Ф. Диагноз изменений общей циркуляции атмосферы и климата / В. Ф. Логинов. – СПб. : Лема, 2026. – 280 с.
7. Логинов, В. Ф. Диагноз глобального климата / В. Ф. Логинов. – СПб. : Лема, 2021. – 304 с.
8. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Мн. : Бел. наука, 2019. – 315 с.
9. Логинов, В. Ф. Изменения климата: тренды, циклы, паузы / В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий. – Мн. : Бел. наука, 2017. – 180 с.
10. Earth Energy Imbalance Visualization – Optimistic Storm. – URL: <https://optimisticstorm.com/earth-energy-imbalance-visualization/> (date of access: 28.04.2026).
11. NASA/LARC/SD/ASDC. CERES Energy Balanced and Filled (EBAF) TOA and Surface Monthly means data in netCDF Edition 4.2 [Data set]. NASA Langley Atmospheric Science Data Center DAAC. – URL: https://doi.org/10.5067/TERRA-AQUA-NOAA20/CERES/EBAF_L3B004.2 (date of access: 28.04.2026).

References

1. Dzerdzeevskii B. L., Kurganskaia V. M., Vitvitskaia Z. M. *Tipizatsiia tsirkuliatcionnykh mehanizmov v Severnom polusharii i harakteristika sinopticheskikh sezonov* [Typification of circulation mechanisms in the Northern Hemisphere and characteristics of synoptic seasons]. *Trudy nauchno-issledovatel'skikh uchrezhdenij Glavnogo upravleniya gidrometeorologicheskoy sluzhby pri Sovete Ministrov SSSR. Ser. 2, Sinopticheskaya meteorologiya* [Proc. of the scientific research institutions. Head Department of Hydrometeorological Service under the USSR Council of Ministers, Synoptic meteorology], Moscow, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1946, Ser. 2, iss. 21, 80 p. (in Russian)
2. Girs A. A. *Makrotcirkuliatcionnyi metod dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov* [Macro-circulation method of long-term meteorological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 435 p. (in Russian)
3. Kononova N. K. *Classifikatsiia tsirkuliatcionnykh mehanizmov Severnogo polushariia po B. L. Dzerdzeevskomu* [Classification of circulation mechanisms of northern hemisphere by B. L. Dzerdzeevskii]. Moscow, RAS, Institute of Geography, 2009, 370 p. (in Russian)
4. Kononova N. K. *Dinamika tsirkuliatcii atmosfery i tsirkuliatcionnye mehanizmy meteorologicheskikh ekstremumov v Arktike* [Atmospheric circulation dynamics and circulation mechanisms of meteorological extremes in the Arctic]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2007, no. 6, pp. 26–42. (in Russian)
5. *Kolebaniia tsirkuliatcii atmosfery severnogo polushariia v XX – nachale XXI veka* [Fluctuations in the circulation of the northern hemisphere atmosphere in the 20th and early 21st centuries]. URL: <https://atmospheric-circulation.ru/datas/> (accessed April 28, 2026). (in Russian)
6. Loginov V. F. *Diagnoz izmenenii obshchei tsirkuliatcii atmosfery i klimata* [Diagnosis of changes in the general circulation of the atmosphere and climate]. Saint Petersburg, Lema Publ., 2026, 280 p. (in Russian)
7. Loginov V. F. *Diagnoz global'nogo klimata* [Diagnosis of changes in the general circulation of the atmosphere and climate]. Saint Petersburg, Lema Publ., 2021, 304 p. (in Russian)
8. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Sovremennye izmeneniia global'nogo i regional'nogo klimata* [Global and regional climate changes]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2019, 315 p. (in Russian)
9. Loginov V. F., Mikutckii V. S. *Izmeneniia klimata: trendy, tsicly, pauzy* [Climate Changes: Trends, Cycles, and Pauses]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2017, 180 p. (in Russian)
10. Earth Energy Imbalance Visualization – Optimistic Storm. URL: <https://optimisticstorm.com/earth-energy-imbalance-visualization/> (accessed April 28, 2026).
11. NASA/LARC/SD/ASDC. (2023). CERES Energy Balanced and Filled (EBAF) TOA and Surface Monthly means data in netCDF Edition 4.2 [Data set]. NASA Langley Atmospheric Science Data Center DAAC. URL: https://doi.org/10.5067/TERRA-AQUA-NOAA20/CERES/EBAF_L3B004.2 (accessed April 28, 2026).

Информация об авторах

Логинов Владимир Фёдорович – академик, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: priyemnaya@nature-nas.by

Микуцкий Владимир Станиславович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Information about the authors

Vladimir F. Loginov – Academician, D. Sc. (Geography), Professor, Chief Researcher, Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: priyemnaya@nature-nas.by

Vladimir S. Mikutsky – Ph. D. (Physical and Mathematical), Leading Researcher, Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-40-54>
УДК 551.583, 551.577, 551.573

Поступила в редакцию 06.04.2026
Received 06.04.2026

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АТМОСФЕРНОГО УВЛАЖНЕНИЯ ДЛЯ АГРОКЛИМАТИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

В. И. Мельник, К. С. Юдыцкая

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Цель исследования состояла в анализе данных увлажнения территории Беларуси, полученных по оценкам различных показателей увлажнения, и обосновании выбора показателя увлажнения для интерпретации характеристик засух при агроклиматическом районировании.

Проведен анализ показателей атмосферного увлажнения территории Беларуси за периоды 1991–2020 гг. (май – сентябрь) и 2000–2022 гг. (май – июнь). Установлено, что высокая корреляция между различными индексами не обеспечивает одинаковую интерпретацию характера засушливых явлений.

Приведены и проанализированы значения испаряемости, рассчитанные различными методами. На основании проведенных исследований в качестве показателя атмосферного увлажнения на данном этапе агроклиматического районирования предложено использование индекса аридности за май – июнь, отражающего отношение сумм осадков и испаряемости. Рассчитаны значения индекса аридности по пунктам наблюдений и агроклиматическим областям, дана их оценка с учетом адаптированных градаций увлажнения, выявлены особенности распределения индекса аридности в течении года.

Ключевые слова: испаряемость; показатели увлажнения; климат; методы оценки засух; индекс аридности.

Для цитирования. Мельник В. И., Юдыцкая К. С. Анализ показателей атмосферного увлажнения для агроклиматического районирования территории Беларуси // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 40–54.

THE ANALYSIS OF THE ATMOSPHERIC HUMIDIFICATION INDEXES FOR THE AGROCLIMATIC ZONING OF THE TERRITORY OF BELARUS

V. I. Melnik, K. S. Yudytskaya

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The aim of the study was to analyze data on the moisture conditions of the territory of Belarus, obtained through assessments of various moisture indicators and to justify the choice of a moisture indicator for interpreting the characteristics of droughts in agroclimatic zoning.

An analysis was conducted of atmospheric moisture indices for Belarus for the periods 1991–2020 (May – September) and 2000–2022 (May – June). It was found that a high correlation between various indices does not ensure a uniform interpretation of the characteristics of drought events.

The values of evaporation calculated using various methods are presented and analyzed. Based on the conducted studies, it is proposed that the aridity index for May – June, which reflects the ratio of precipitation totals to evaporation, be used as an index for atmospheric moisture assessment at this stage of agroclimatic zoning. Aridity index values have been calculated for observation stations and agroclimatic regions; they have been evaluated taking into account adapted moisture gradations, and the characteristics of the aridity index distribution throughout the year have been identified.

Keywords: evaporation; humidification indices; climate; drought assessment methods; aridity index.

For citation. Melnik V. I., Yudytskaya K. S. The analysis of the atmospheric humidification indexes for the agroclimatic zoning of the territory of Belarus. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 40–54.

Введение. Внимание отечественных и зарубежных исследователей к изучению характеристик увлажнения связано, прежде всего, с тем, что его экстремумы (особенно засухи) способны наносить значительный ущерб погодозависимым секторам экономики и в первую очередь сельскому хозяйству. Экстремальность климата (увлажнения) возрастает в условиях глобального потепления. В условиях

изменения климата повторяемость атмосферных и почвенных засух увеличивается, поэтому мониторинг засушливых явлений приобретает все более важное значение. За рубежом и в Беларуси за последние годы появился ряд исследований, посвященных изучению засушливых явлений, атмосферных и почвенных засух. При этом для оценки условий увлажнения территории широко используются как классические показатели увлажнения (ГТК Селянинова, индекс Педя, рекомендованный Всемирной метеорологической организацией (ВМО) стандартизованный индекс осадков (SPI)), так и показатели увлажнения, рассчитанные с применением математических моделей физических процессов (испаряемость, индекс аридности – AI), а также с применением спутниковых и наземных данных. В то же время исследования показывают, что высокие коэффициенты корреляции между временными рядами показателей атмосферного увлажнения не гарантируют одинаковую интерпретацию характеристик засух на исследуемых территориях за один и тот же период, различными показателями увлажнения.

Цель работы – провести анализ данных увлажнения территории Беларуси, полученных по оценкам различных показателей увлажнения, сравнить их и обосновать выбор показателя увлажнения для интерпретации характеристик засух на данном этапе агроклиматического районирования.

Материалы и методы исследования. Исследования показателей увлажнения базировались на материалах Государственного климатического кадастра с использованием месячных, сезонных и годовых значений температуры воздуха, осадков, влажности воздуха и почвы (данные наблюдений по 47 гидрометеорологическим станциям Государственной сети гидрометеорологических наблюдений за наиболее теплые последние десятилетия (2000–2022 гг.)). Для расчета рекомендованного Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО) индекса аридности (AI) на территории Беларуси использовались данные станционных наблюдений по атмосферным осадкам и сеточные данные по потенциальному испарению, представленные реанализом ERA5 на основе глобальной модели атмосферы IFS Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды. Картографирование основных показателей увлажнения выполнено с применением программы ArcGIS.

Результаты и их обсуждение. Существует ряд показателей для оценки увлажнения территории, в том числе засух. Для европейской части России и территории бывшего Советского Союза были разработаны и использовались индекс засушливости Г. Н. Высоцкого, показатель засушливости П. И. Колоскова, баланс увлажнения Р. Э. Давида, гидротермический коэффициент (ГТК) Г. Т. Селянинова, показатель засушливости Н. В. Бова, коэффициент увлажнения Н. Н. Иванова, показатель сухости климата В. П. Попова, радиационный индекс сухости М. И. Будыко, показатель увлажнения С. И. Костина, коэффициент увлажнения С. А. Сапожниковой, показатель атмосферного увлажнения Д. И. Шашко, индекс засушливости Д. А. Педя, коэффициент увлажнения Е. С. Улановой с соавторами [1]. В последние три десятилетия наиболее используемыми показателями для оценки атмосферных засух на сопредельных с Беларусью территориях стран СНГ являются показатели изменения температуры и осадков: ГТК Селянинова, индекс Д. А. Педя [2–4]. Кроме того, широкое распространение получили наиболее известные за рубежом количественные показатели засухи – стандартизованный индекс осадков (SPI – Standardized Precipitation Index) и стандартизованный индекс осадков и испаряемости (SPEI – Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), а также показатели засух, рассчитанные по значениям испаряемости [2, 5–8]. Большинство показателей засушливости выражаются отношением прихода количества влаги (осадки, запасы влаги в почве и т. д.) к ее расходу (испаряемость, дефицит влажности воздуха, температура и т. д.) с использованием различных эмпирических коэффициентов.

При агроклиматическом районировании территории Беларуси известным ученым климатологом А. И. Кайгородовым в 1934–1935 гг. впервые в качестве показателя увлажнения была предложена годовая сумма атмосферных осадков [9]. По указанному показателю сложно судить об агроклиматических условиях произрастания сельскохозяйственных культур в вегетационный период. Работы по агроклиматическому районированию были продолжены в 1950-х годах сотрудниками Минской гидрометеорологической обсерватории под руководством Н. И. Малишевской [10]. В качестве показателя увлажнения был предложен ГТК Селянинова за период с температурой выше 10 °С. В 1973 г. профессором А. Х. Шкляром разработано новое агроклиматическое районирование территории Беларуси [11]. Показатель увлажнения по Н. Н. Иванову, примененный при оценке влагообеспеченности территории в указанном агроклиматическом районировании А. Х. Шкляра и выражающий отношение годового количества осадков к годовой испаряемости, характеризует увлажнение территории в целом за год, что явно недостаточно при оценке условий влагообеспеченности периода активной вегетации, особенно при текущих условиях роста количества осадков в зимний период. В 2016–2017 гг. было выполнено новое агроклиматическое районирование территории Беларуси с учетом изменения климата за период потепления 1989–2015 гг., где в качестве показателя увлажнения для районирования территории был предложен ГТК Селянинова за май – июль [12]. Следует отметить, что ГТК Селянинова в свое время широко использовался советскими учеными при районировании различных территорий, включая агроклиматическое районирование Советского Союза и всего мира [13, 14].

В Украине генеральная схема агроклиматического районирования, в основу которой положены значения ГТК Селянинова, была разработана в 1986 г. [15]. В последних работах оценка увлажнения территории Украины сделана с применением показателей увлажнения SPI и SPEI [16]. В Казахстане выполнено районирование территории на основе актуальных данных, учитывающее потребности основных сельскохозяйственных культур в тепле и влаге, где в качестве показателя увлажнения использован уточненный ГТК Селянинова [17].

К последним научным исследованиям по оценкам увлажнения территории Беларуси по различным показателям следует отнести исследования по оценке увлажнения территории в различные периоды по показателю ГТК Селянинова, количеству осадков, запасам продуктивной влаги верхнего слоя почвы [18, 19]. Рассчитаны показатели засушливости территории страны за различные периоды на основании SPI, рекомендованного ВМО [20]. Дана оценка атмосферного увлажнения территории Беларуси по среднегодовым разностям между количеством осадков и потенциальным испарением (испаряемостью) в атмосфере [21], а также по отношению осадков и испаряемости. Выполнен большой объем исследований по оценке запасов влаги и повторяемости почвенных засух на сельскохозяйственных землях Белорусского Полесья с построением карты уязвимости почв к засухам Гомельской и Брестской областей и Белорусского Поозерья [22, 23].

Перспективным направлением является использование спутниковой информации при мониторинге засух и ее комплексирование с наземными агрометеорологическими наблюдениями, что позволяет получать ежедневную информацию об увлажнении верхнего слоя почвы на больших площадях. В настоящее время в Институте природопользования НАН Беларуси получены и обработаны спутниковые данные европейской организации спутниковой метеорологии (EUMETSAT) со спутников Metop-A, Metop-B, Metop-C. Разработана компьютерная программа, позволяющая получать карты влажности на основе спутниковых данных. Осуществлена координатная привязка спутниковых данных для станций наземного наблюдения. Следует отметить, что данные спутниковых измерений в целом хорошо отражают тенденцию изменений влажности почвы верхнего поверхностного слоя, однако пока не удалось достичь однозначной интерпретации спутниковой информации для достоверной численной оценки поверхностной влажности почвы [24]. Вопрос использования спутниковой информации для оперативного мониторинга засух на территории Беларуси требует дальнейших проработок и исследований. В этой связи заслуживают внимания последние исследования по оценке проявления засух на почвах Белорусского Поозерья с использованием температурно-влажностных и вегетационных индексов по данным дистанционного зондирования [25, 26].

Рассмотрим результаты оценки увлажнения территории Беларуси с применением различных показателей увлажнения. В работе [27] выполнена оценка атмосферного увлажнения на территории Беларуси за июнь – август за период новых климатических норм (1991–2020 гг.) с использованием гидротермического коэффициента Г. Т. Селянинова (ГТК), индекса засушливости Д. А. Педя (S), стандартизованного индекса осадков SPI. Установлено распространение за указанный период на большей части территории Беларуси оптимальных условий увлажнения по ГТК, засушливых условий (на юго-востоке, северо-востоке и в центральной части страны) по индексу Педя. По стандартизованному индексу осадков SPI территория Беларуси характеризуется как нормальным увлажнением (почти весь юг, северо-восток, крайний восток страны), так и слабозасушливыми условиями в вегетационный период. В целом полученные результаты говорят о неодинаковой интерпретации характеристик засух известными показателями увлажнения за один и тот же период. При этом в данном исследовании отмечены, статистически значимые ($r \geq 0,35$) коэффициенты пространственной корреляции между индексами в летние месяцы, особенно в августе (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты пространственной корреляции (r) индексов атмосферного увлажнения в летние месяцы 1991–2020 гг.

Table 1. Spatial correlation coefficients (r) of atmospheric moisture indices in the summer months of 1991–2020

Индексы	Месяц		
	июнь	июль	август
ГТК – S	–0,61	–0,64	–0,85
ГТК – SPI	0,47	0,54	0,72
S – SPI	–0,41	–0,61	–0,86

Приведенный в работе [28] обзор современных методов исследования и оценки засух также показал, что мониторинг и определение засух в целом представляет собой актуальную и многогранную задачу, которая, несмотря на многочисленные исследования, остается нерешенной и в некоторых регионах приобретает приоритетное значение на фоне наблюдающихся изменений климата. Дальнейшие

исследования в этой области должны сосредоточиться на повышении эффективности применения различных показателей оценки засух и их комбинаций, а также на разработке критериев, соответствующих уровням интенсивности засухи, для обнаружения и раннего предупреждения засух.

При выполнении НИР «Новое агроклиматическое районирование и оценка агроклиматических ресурсов территории Беларуси в условиях изменения климата» (регистрационный номер 20231603) для оценки и выбора показателя атмосферного увлажнения территорий агроклиматических областей, подобластей, районов выполнено пространственное распределение показателей атмосферного увлажнения (ГТК Селянинова, стандартизованного индекса осадков SPI, коэффициента увлажнения Шашко за наиболее критический период в жизни растений – май – июнь 2000–2020 гг. (рис. 1).



Рис. 1. Пространственное изменение осредненных показателей атмосферного увлажнения (а – гидротермического коэффициента Селянинова; б – стандартизованного индекса осадков SPI; в – коэффициента увлажнения Шашко на территории Беларуси), май – июнь 2000–2022 гг.

Цвета на картах: желтый – слабая и умеренная засуха, зеленый – нормальное и умеренное увлажнение, темно-зеленый – избыточное увлажнение

Fig. 1. Spatial change in the average indices of atmospheric humidification (a – Selyaninov hydrothermal coefficient; b – standardized precipitation index SPI; c – Shashko humidification coefficient) in the territory of Belarus, May – June 2000–2022.

Colors on cards: yellow – mild and moderate drought; green – normal and moderate humidification; dark green – excessive humidification)

Анализ увлажнения территории Беларуси по различным показателям за май – сентябрь 1991–2020 гг., и май – июнь 2000–2022 гг. показал неоднозначность полученных оценок увлажнения территории (от избыточного увлажнения по коэффициенту ГТК до слабой и умеренной засухи по SPI и Шашко). Подобные результаты, когда высокие коэффициенты корреляции между временными рядами показателей, отражающих засушливость и переувлажнение, не гарантируют одинаковую интерпретацию характеристик засух, показали проведенные исследования в [5]. При этом выявлено, что ГТК по сравнению с другими показателями существенно завышает повторяемость сильных засух в период активной вегетации практически на всей территории исследования. Таким образом, в исследовании подчеркивается, что до сих пор не существует признанного количественного показателя засухи. Каждый используемый показатель характеризует ситуацию с засушливыми условиями с определенной точки зрения. Отсюда следует, что возможности единого подхода к сравнению результатов на основе применения различных показателей засух ограничены [5]. В наших исследованиях показатель ГТК показал более высокие значения увлажнения территории [27]. Необходимо отдельно отметить применение стандартизованного индекса осадков SPI, рекомендованного ВМО в качестве показателя для мониторинга засух в национальных метеослужбах [28], Специальные исследования российских ученых по применению этого показателя на территории ряда регионов России показали его высокую корреляцию с другими показателями увлажнения и возможность использования при прогнозах урожайности [7]. Наши исследования подтвердили, что SPI дает хорошие результаты при сравнительной оценке увлажнения по различным периодам. Значения увлажнения по SPI за конкретный период зависят от длины ряда наблюдений за осадками и поэтому их трудно сравнивать с показателями увлажнения (ГТК, Шашко и др.), которые рассчитываются за конкретный период, независимо от предшествующего периода. Неопределенность оценок увлажнения для одного и того же периода по SPI при выборе различных периодов в качестве базового отражена в табл. 2.

Таблица 2. Значения увлажнения по стандартизированному индексу осадков SPI за 2000–2022 гг. (май – июнь) в зависимости от периода наблюдений

Table 2. Moisture values according to the standardized precipitation index SPI for 2000–2022 (May – June) depending on the observation period

Период	Станция				
	Василевичи	Горки	Минск	Новогрудок	Шарковщина
1945–2022	–0,04	0,08	0,03	–0,12	0,02
1955–2022	–0,07	0,13	0,01	–0,08	0,01
1965–2022	–0,16	0,09	0,00	–0,08	–0,01
1975–2022	–0,12	0,10	0,02	0,01	–0,01
1985–2022	–0,15	0,01	0,01	–0,06	–0,08
1995–2022	–0,10	–0,03	–0,06	–0,06	–0,06

Оценки увлажнения по испарению. При оценках влияния возможного изменения климата на гидротермические условия территории чаще всего применяют количественные показатели, представляющие собой отношение ресурсов влаги к потребности во влаге. В качестве ресурсов влаги используют атмосферные осадки, а потребность во влаге определяют испаряемостью или фактором, ее заменяющим. Испаряемость является условной величиной, характеризующей максимально возможное (потенциально возможное, не лимитируемое запасами воды) испарение в данной местности при существующих атмосферных условиях. Подразумевается, что это либо испарение с поверхности воды в испарителе, либо испарение с открытой водной поверхности крупного естественного пресноводного водоема, либо испарение с избыточно увлажненной почвы. Полного совпадения между указанными определениями нет, так как условия испарения в испарителе отличаются от условий в естественном водоеме, а эти последние – от условий испарения с избыточно увлажненной почвы. Величина испаряемости определяется радиационным балансом, температурой и влажностью воздуха и скоростью ветра, то есть, по существу, комплексом метеорологических условий. Эту величину можно определять как расчетными методами с использованием метеорологических данных, так и с помощью водных испарителей, применяя эмпирические коэффициенты для приведения полученных значений к величинам испаряемости [8].

О тенденциях в изменении условий увлажнения территории Беларуси, складывающихся в результате потепления климата, можно судить по среднегодовым разностям между количеством осадков и потенциальным испарением (испаряемостью) в атмосфере. Как показали исследования, до 2000 г. годовое количество осадков превышало годовую испаряемость на всей территории Беларуси, причем в северных регионах – до 300 мм [21]. За период 2000–2020 гг. соотношение между осадками и испаряемостью поменялось кардинальным образом. В настоящее время отрицательный баланс (превышение испарения над осадками) наблюдается на всей территории Брестской и Гомельской областей, нулевой баланс – на юге Гродненской, Минской и Могилёвской областей, а максимальное превышение осадков над испаряемостью в остальной части страны – не более 150 мм. Такое снижение водного баланса вызвано быстрым потеплением воздуха, а вместе с этим и увеличением влагоемкости атмосферы при отсутствии существенного роста годового количества атмосферных осадков.

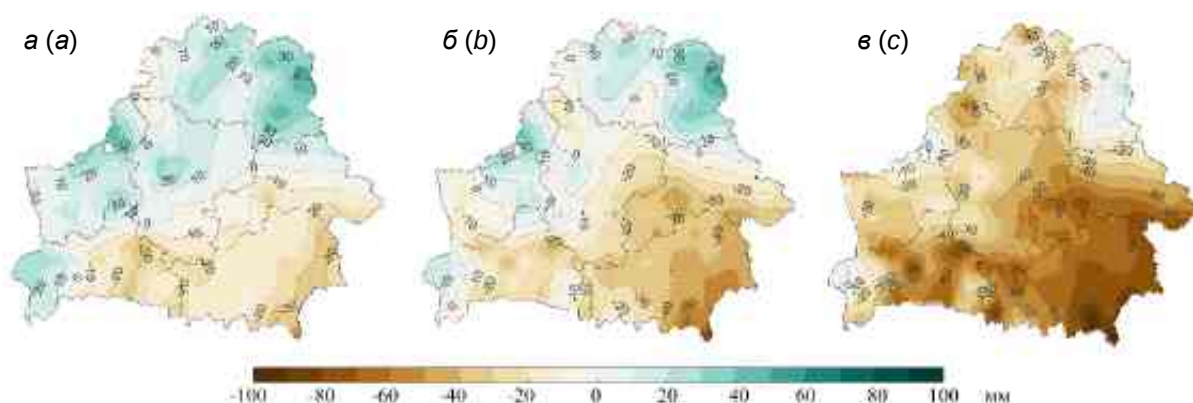


Рис. 2. Разность между количеством осадков и суммарным испарением за май – сентябрь по периодам: а – 1961–1990 гг.; б – 1981–2010 гг.; в – 1991–2020 гг. [30]

Fig. 2. The difference between precipitation and total evaporation in May–September by periods: а – 1961–1990; б – 1981–2010; в – 1991–2020 [30]

На рис. 2 представлена разность между приходной (осадки) частью водного баланса и расходной ее частью (суммарным испарением) за период активной вегетации (май – сентябрь) по различным климатическим периодам. Как следует из рис. 2, последнее тридцатилетие, характеризующее период потепления, является засушливым на большей части территории и испарение практически во всех районах превышает количество осадков.

С целью оценки различных методов расчета испаряемости для территории Беларуси (станции Шарковщина, Горки, Минск, Волковыск, Василевичи) рассчитаны значения испаряемости (мм) за май – сентябрь 2013–2022 гг. Результаты расчетов испаряемости различными методами (Волчека, Иванова, Костина, Ольдекопа, Пенмана – Монтейта, Селянинова, Шашко) приведены на рис. 3, 4.

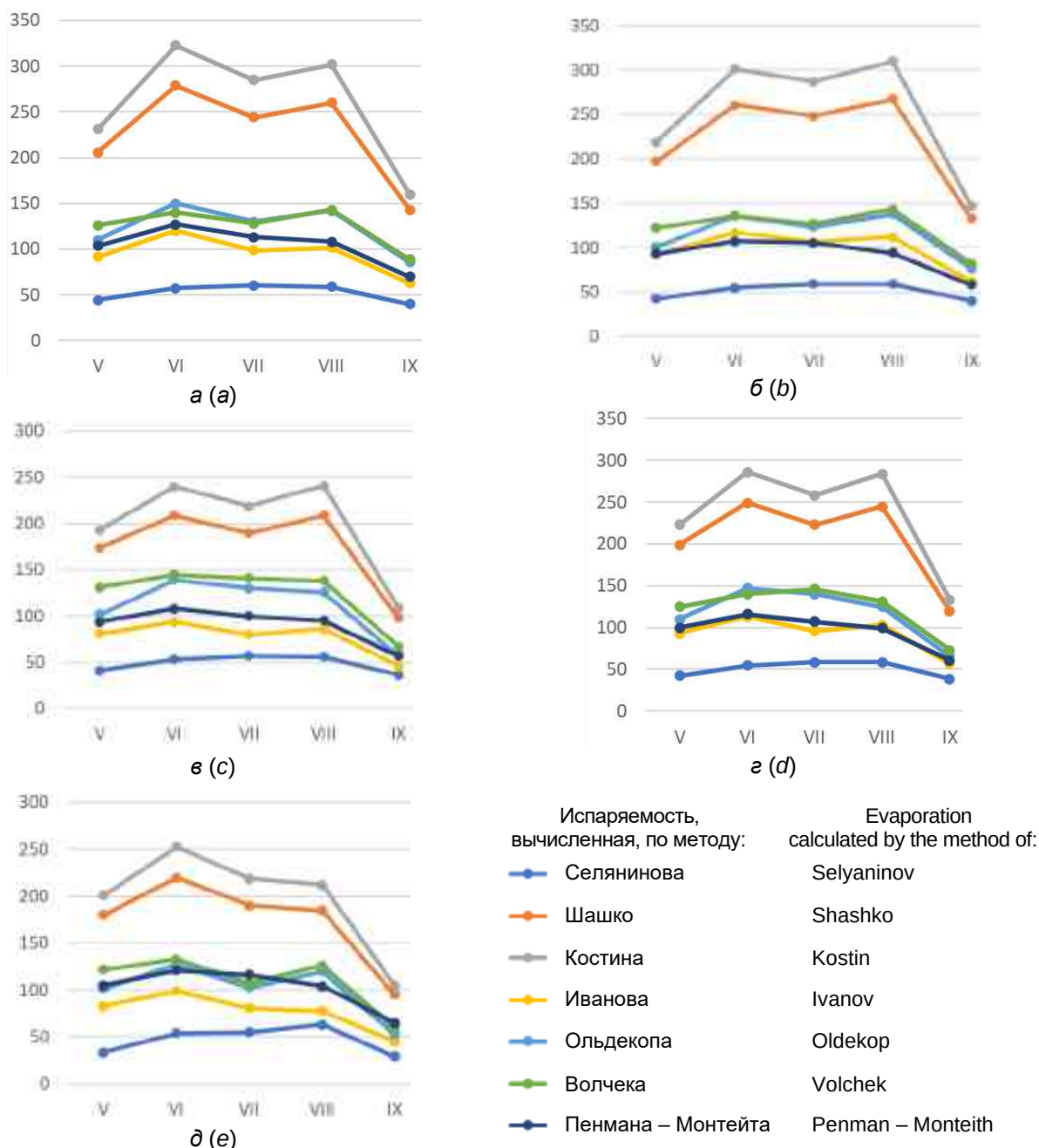


Рис. 3. График сезонного хода (май – сентябрь) испаряемости, вычисленной по различным методам, 2013–2022 гг.: а – Василевичи; б – Волковыск; в – Горки; г – Минск; д – Шарковщина

Fig. 3. The graph of the seasonal change (May – September) of evaporation calculated by various methods, 2013–2022: а – Vasilevichi; б – Volkovysk; в – Gorki; д – Minsk; е – Sharkovshchina

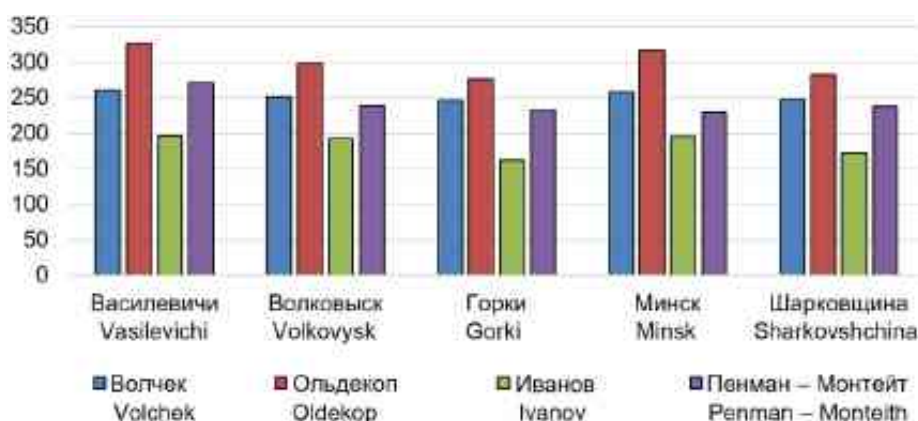


Рис. 4. Испаряемость, вычисленная по различным методам, май – июнь 2000–2022 гг.

Fig. 4. Evaporation calculated by various methods, May – June 2000–2022

Испаряемость по Селянинову:

$$E = 0,1 \sum T \geq 10^{\circ}\text{C},$$

где T – температура.

Испаряемость по Шашко:

$$E = \sum d,$$

где d – дефицит влажности воздуха.

Испаряемость по Костину:

$$E = dn (1 + 0,004t)^2,$$

где d – средний дефицит влажности за период; n – число дней в периоде; t – средняя температура воздуха за данный период.

Испаряемость по Иванову:

$$E = 0,0018 (25 + T)^2 (100 - r),$$

где T – среднемесячная температура воздуха; r – среднемесячная относительная влажность воздуха.

Испаряемость по Ольдекопу:

$$E = md,$$

где $m = 22,7$ для теплого периода года (апрель – октябрь) и $m = 16,0$ для холодного периода года (ноябрь – март); d – средний месячный дефицит влажности, мм.

Испаряемость по Волчку:

$$E = \langle LZ_m \rangle = R + P + \Delta B + \Delta Z_m,$$

где L – скрытая теплота испарения, ккал/см³; Z_m – эквивалент теплоэнергетических ресурсов – максимально возможное испарение (испаряемость), мм; R и P – положительные составляющие радиационного баланса и турбулентного теплообмена соответственно, ккал/см²; ΔB – изменения теплозапасов деятельного слоя почвы, ккал/см²; ΔZ_m – расход тепла на таяние снега, льда и прогревание почвы, ккал/см².

Испаряемость по Пенману – Монтейту:

$$E = \left(0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{0,925}{T + 273} u_2 (e_s - e_a) \right) / (\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)),$$

где R_n – чистая радиация на поверхности культуры, МДж·м⁻²·сут⁻¹; G – плотность теплового потока почвы, МДж·м⁻²·сут⁻¹; γ – психометрическая постоянная, кПа·К⁻¹; T – среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м, °С; u_2 – скорость ветра на высоте 2 м, м·с⁻¹; e_s – давление насыщенного пара, кПа; e_a – фактическое давление пара, кПа; $(e_s - e_a)$ – дефицит давления насыщенного пара, кПа; Δ – наклон кривой давления пара, кПа·К⁻¹.

Анализ значений испаряемости, полученных различными методами, показал следующее:

– все показатели демонстрируют одинаковую тенденцию изменения испаряемости по месяцам года;

– расчет испаряемости по ГТК Селянинова дает самые низкие значения, по методу Костина и Шашко – самые высокие значения испаряемости (см. рис. 3). Рассчитанные значения испаряемости по ГТК и методу Шашко объясняют расхождения в оценках увлажнения территории, приведенные в работе [27] и на рис. 1. На рис. 4 значения испаряемости заведомо представлены без вышеуказанных методов (ГТК Селянинова, Костина, Шашко).

В исследованиях российских ученых по оценкам испаряемости различными методами расчета на основе статистического анализа и пространственного сравнения картосхем распределения средних годовых значений испаряемости был сделан вывод о том, что из тринадцати рассмотренных методов расчета испаряемости наиболее надежными для использования на территории юга Русской равнины являются методы А. И. Будаговского, Х. Л. Пенмана и Д. Л. Монтейта, Н. Н. Иванова, М. И. Будыко, А. Р. Константинова, Э. М. Ольдекопа, К. Тортвейта [8]. Как видно из рис. 3 и 4, все указанные методы расчета испаряемости (Пенмана – Монтейта, Иванова, Ольдекопа, а также метод Волчека) показали довольно близкие значения. Анализ этих данных (испаряемости) позволяет говорить о том, что метод Пенмана – Монтейта дает наименьшее отклонение от среднего значения испаряемости, рассчитанного по всем указанным методам испаряемости. Необходимо отметить, что расчет испаряемости по методу Пенмана – Монтейта рекомендован экспертами ФАО [8] и впервые для территории Беларуси был использован С. А. Лысенко для расчета рекомендованного ФАО индекса аридности (AI), определяемого как среднее значение отношения сумм атмосферных осадков P и потенциального испарения (испаряемости) [29, 30].

С учетом изложенного на данном этапе агроклиматического районирования индекс аридности (AI) принят в качестве основного показателя атмосферного увлажнения территории за наиболее критический период в жизни растений (май – июнь).

Для оценки современных изменений индекса аридности (AI) на территории Беларуси нами использованы данные станционных наблюдений по атмосферным осадкам и сеточные данные по потенциальному испарению, представленные реанализом ERA5 на основе глобальной модели атмосферы IFS Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды. Станционные значения осадков интерполировали методом обыкновенного кригинга с учетом данных всех станций государственной гидрометеорологической сети и данных станций соседних государств. Индекс аридности (AI), приведенный на рис. 5, вычисляли как среднее значение отношения сумм атмосферных осадков P и потенциального испарения (испаряемости) за период с 2000 по 2022 г. (май – июнь).



Рис. 5. Пространственное распределение индекса аридности (AI), май – июнь 2000–2022 гг.

Fig. 5. Spatial distribution of the aridity index (AI), May – June 2000–2022

С учетом градаций индекса аридности (AI), рекомендованных ФАО [31], для территории Беларуси предлагается следующее уточненное наименование его градаций, с добавлением градации «сильное увлажнение и переувлажнение» (табл. 3).

Таблица 3. Уточненные градации индекса аридности (AI) для территории Беларуси

Table 3. Updated aridity index (AI) grades for the territory of Belarus

Значение индекса аридности (AI)	Характеристика условий увлажнения территории
$KY < 0,05$	Экстремально засушливые условия
$0,05 \leq KY < 0,20$	Сильнозасушливые условия
$0,20 \leq KY < 0,50$	Среднезасушливые условия
$0,50 \leq KY < 0,65$	Слабозасушливые условия (недостаточное увлажнение)
$0,65 \leq KY < 1,00$	Умеренное увлажнение
$KY \geq 1,00$	Сильное увлажнение и переувлажнение

Значения индекса аридности (AI) по пунктам наблюдений по агроклиматическим областям (по отдельным месяцам, за май – июнь, период IV–X и год за 2000–2022 гг.) приведены в табл. 4.

Таблица 4. Значения коэффициента атмосферного увлажнения (индекса аридности – AI), 2000–2022 гг.

Table 4. Values of the atmospheric humidification coefficient (aridity index – AI), 2000–2022

Агроклиматическая область, станция	Продолжительность периода									
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	V–VI	IV–X	ГОД
<i>Северная агроклиматическая область</i>										
Верхнедвинск	0,51	0,56	0,59	0,68	0,76	1,00	2,95	0,60	0,73	1,00
Езерище	0,53	0,60	0,59	0,77	0,72	0,94	3,55	0,62	0,77	1,06
Полоцк	0,58	0,57	0,59	0,73	0,73	0,91	3,14	0,60	0,75	1,04
Шарковщина	0,55	0,57	0,56	0,71	0,80	0,91	2,67	0,58	0,74	0,97
Витебск	0,59	0,59	0,55	0,75	0,76	1,02	3,38	0,58	0,77	1,12
Лынтупы	0,56	0,58	0,56	0,67	0,80	0,98	3,00	0,59	0,75	1,06
Докшицы	0,58	0,57	0,53	0,74	0,79	0,91	2,81	0,56	0,74	1,00
Березинский заповедник	0,57	0,59	0,55	0,77	0,78	0,88	2,77	0,59	0,75	1,01
Орша	0,55	0,62	0,55	0,62	0,71	0,89	2,50	0,60	0,71	0,95
Вилейка	0,60	0,64	0,57	0,71	0,77	0,88	2,61	0,63	0,75	1,00
Горки	0,57	0,59	0,56	0,66	0,71	0,84	2,57	0,60	0,72	0,97
Ошмяны	0,57	0,68	0,56	0,75	0,89	0,87	2,55	0,64	0,78	1,02
<i>Центральная агроклиматическая область</i>										
Борисов	0,61	0,62	0,55	0,76	0,76	0,86	2,35	0,61	0,74	0,99
Воложин	0,56	0,64	0,58	0,70	0,73	0,96	2,65	0,64	0,75	0,99
Лида	0,52	0,62	0,53	0,74	0,69	0,91	2,38	0,59	0,72	0,98
Минск	0,63	0,67	0,60	0,82	0,73	0,84	2,43	0,65	0,77	1,04
Могилев	0,58	0,57	0,49	0,68	0,58	0,78	2,20	0,56	0,66	0,92
Березино	0,56	0,56	0,52	0,70	0,59	0,77	2,08	0,56	0,66	0,91
Гродно	0,44	0,48	0,41	0,76	0,55	0,77	1,62	0,46	0,60	0,78
Новогрудок	0,63	0,71	0,57	0,91	0,59	1,05	2,64	0,65	0,80	1,11
Столбцы	0,55	0,59	0,57	0,74	0,61	0,87	2,12	0,61	0,70	0,93
Марьина Горка	0,54	0,56	0,49	0,73	0,60	0,72	2,04	0,54	0,66	0,88
Кличев	0,54	0,51	0,49	0,72	0,53	0,72	2,15	0,52	0,64	0,86
Славгород	0,54	0,59	0,54	0,71	0,57	0,82	2,19	0,58	0,68	0,92
Костюковичи	0,55	0,58	0,59	0,66	0,49	0,92	2,31	0,61	0,68	0,91
Бобруйск	0,59	0,55	0,48	0,68	0,50	0,68	2,15	0,53	0,63	0,88

Окончание табл. 4

Агроклиматическая область, станция	Продолжительность периода									
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	V–VI	IV–X	ГОД
Южная агроклиматическая область										
Волковыск	0,47	0,63	0,48	0,77	0,56	0,87	1,69	0,57	0,66	0,88
Барановичи	0,53	0,61	0,59	0,84	0,53	0,81	1,92	0,60	0,70	0,93
Слуцк	0,53	0,56	0,57	0,68	0,58	0,74	1,96	0,58	0,66	0,89
Жлобин	0,55	0,56	0,45	0,74	0,50	0,76	2,15	0,51	0,65	0,89
Ганцевичи	0,54	0,65	0,59	0,81	0,60	0,79	1,85	0,63	0,71	0,92
Ивацевичи	0,52	0,66	0,53	0,71	0,56	0,81	1,61	0,60	0,66	0,88
Пружаны	0,42	0,52	0,41	0,64	0,52	0,80	1,41	0,48	0,58	0,76
Октябрь	0,54	0,50	0,45	0,74	0,54	0,72	1,90	0,49	0,63	0,85
Высокое	0,46	0,54	0,49	0,63	0,54	0,79	1,43	0,53	0,60	0,80
Полесская	0,44	0,49	0,54	0,70	0,54	0,64	1,47	0,54	0,60	0,75
Василевичи	0,50	0,54	0,44	0,63	0,52	0,73	1,87	0,49	0,60	0,83
Житковичи	0,54	0,56	0,47	0,83	0,56	0,76	2,00	0,52	0,67	0,92
Брагин	0,38	0,44	0,34	0,49	0,46	0,72	1,66	0,40	0,51	0,68
Новая агроклиматическая область										
Гомель	0,46	0,53	0,48	0,69	0,48	0,72	1,97	0,52	0,61	0,82
Брест	0,43	0,58	0,47	0,61	0,60	0,78	1,28	0,54	0,60	0,78
Пинск	0,45	0,50	0,49	0,74	0,53	0,77	1,52	0,51	0,62	0,82
Мозырь	0,51	0,54	0,42	0,71	0,48	0,65	1,87	0,49	0,60	0,84

На рис. 6 приведены средние значения индекса аридности (AI) по агроклиматическим областям за теплый период и год на территории Беларуси за 2000–2022 гг. На указанном рисунке проведены красные линии, характеризующие различные градации увлажнения территории: 0,50 и менее – засушливые условия, требующие принятия мер для улучшения влагообеспеченности территории; 0,50–0,65 – слабозасушливые условия; 0,65–1,00 – умеренное увлажнение; 1,00 и более – сильное увлажнение и переувлажнение. Следует отметить, что в целом за год вся территории Беларуси попадает в градацию умеренного увлажнения (0,65–1,00). За теплый период (IV–X) большая часть территории Беларуси (Северная и Центральная агроклиматические области) также попадают в зону умеренного увлажнения. Наименьшие значения индекса аридности (AI) наблюдаются в апреле, мае, июне. Причем в Новой агроклиматической области в апреле и июне значения индекса аридности (AI) меньше 0,50. Июль с большим количеством осадков по всем агроклиматическим областям характеризуется умеренным увлажнением. Наиболее увлажненным месяцем за теплый период оказался октябрь с градациями сильного увлажнения от 1,66 в Новой агроклиматической области до 2,88 – в Северной (за счет уменьшения температуры воздуха и испаряемости и увеличения количества осадков по сравнению с сентябрем). Полученные значения индекса аридности (AI) для мая – июня показывают, что для большей части территории этот период характеризуется как слабозасушливый. Детализация значений индекса аридности (AI) по отдельным пунктам позволяет оценить дисперсию наблюдаемых значений увлажнения территории. Как показали проведенные исследования, индекс аридности (AI) на территории Беларуси за 2000–2022 гг. в мае – июне в отдельные годы изменялся от 0,08 на станции Мозырь (2015 г.) до 1,46 на станции Полесская (2013 г.).

Принято считать, что значения индекса аридности (AI) менее 0,50 являются границей недостаточного увлажнения, при которой необходимо проводить мероприятия по улучшению влагообеспеченности территории. В основном это утверждение касается годовых значений индекса аридности (AI). За более короткий период времени, например, месяц, следует учитывать состояние растений с учетом запасов продуктивной влаги в почве.

Заслуживает внимания показатель атмосферного увлажнения (дефицит испарения – ΔE), предложенный А. И. Будаговским [1]:

$$\Delta E = E_0 - E,$$

где E_0 – испаряемость; E – испарение.

Этот показатель увлажнения находится в тесной связи с состоянием растений и урожаем. Чем больше ΔE , тем засушливее условия. Впервые рассчитанное для территории Беларуси пространственное распределение этого показателя для мая – июня за 2000–2022 гг. показало на большей части территории сходство с индексом аридности (AI) (рис. 7).

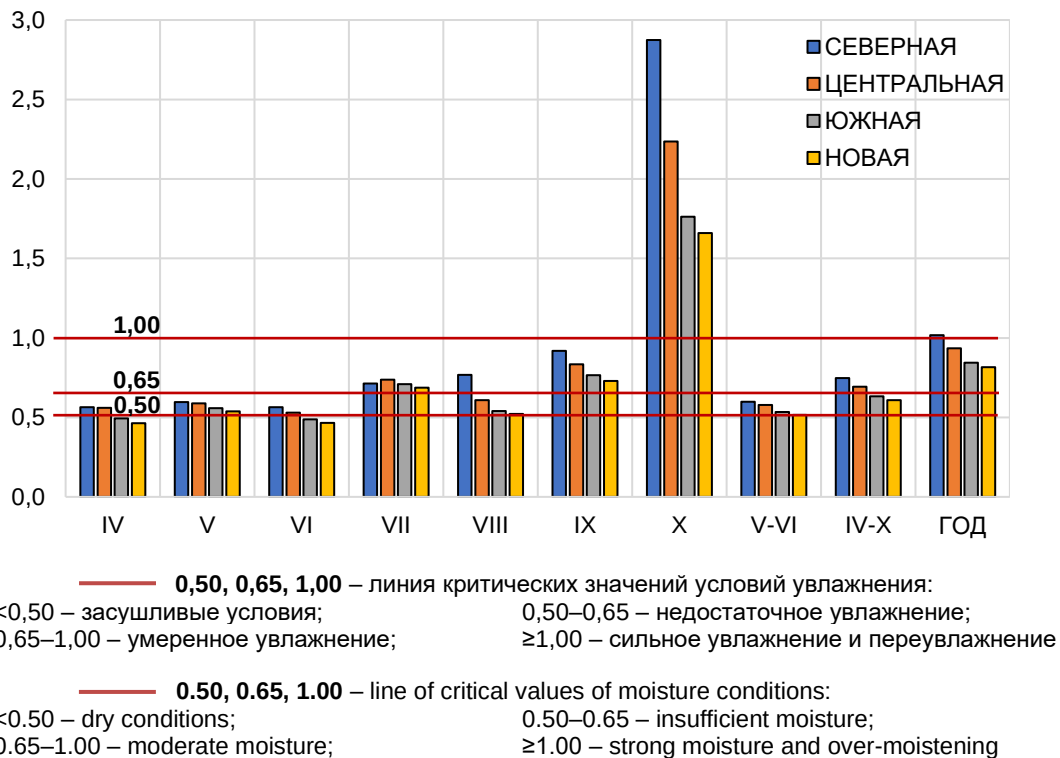


Рис. 6. Средние значения индекса аридности по Северной, Центральной, Южной и Новой агроклиматическим областям за теплый период, май – июнь и год на территории Беларуси, 2000–2022 гг.

Fig. 6. Average values of the aridity index for the Northern, Central, Southern, and New agroclimatic regions for the warm period, May – June and the year in Belarus, 2000–2022



Рис. 7. Пространственное распределение показателя атмосферного увлажнения (по А. И. Будаговскому), май – июнь 2000–2022 гг.

Fig. 7. Spatial distribution of the atmospheric humidification index (according to A. I. Budagovsky), May – June 2000–2022

Выводы.

1. Анализ условий увлажнения территории Беларуси по различным показателям, за май – сентябрь 1991–2020 гг. и май – июнь 2000–2022 гг. показал неоднозначность полученных оценок увлажнения территории различными показателями за один и тот же период.

2. Исследованы значения испаряемости, рассчитанные различными методами. На основании проведенных исследований в качестве показателя атмосферного увлажнения на данном этапе агроклиматического районирования для территории Беларуси предложен уточненный индекс аридности за наиболее критический период в развитии растений – май – июнь.

3. Рассчитаны значения индекса аридности по пунктам наблюдений и агроклиматическим областям и дана их оценка с учетом уточненных для территории Беларуси градаций. Показаны особенности распределения значений индекса аридности по месяцам вегетационного периода, теплый период (IV–X) и год.

4. В целом за год вся территории Беларуси попадает в градацию умеренного увлажнения (0,65–1,00). За теплый период (IV–X) большая часть территории Беларуси (Северная и Центральная агроклиматические области) также попадают в зону умеренного увлажнения. Наименьшие значения индекса аридности (AI) наблюдаются в апреле, мае и июне, причем в Новой агроклиматической области в апреле и июне значения индекса аридности (AI) меньше 0,50, что характеризует засушливые условия, требующие принятия мер для улучшения влагообеспеченности территории.

Список использованных источников

1. Грингоф, И. Г. Основы сельскохозяйственной метеорологии / И. Г. Грингоф, А. Д. Клеценко. – Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2011. – Т. 1 : Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия. – 808 с.
2. Черенкова, Е. А. Количественные оценки атмосферных засух в федеральных округах европейской территории России / Е. А. Черенкова // Известия РАН. Серия географическая. – 2013. – № 6. – С. 76–85.
3. Оценка тенденций изменения засушливости для территории Южного Урала в период 1960–2019 гг. с использованием различных методов / Д. Ю. Васильев, В. В. Водопьянов, В. А. Семенов, А. А. Чибилев // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2020. – Т. 494, № 1. – С. 91–96.
4. Галимова, Р. Г. Агроклиматические ресурсы Республики Башкортостан / Р. Г. Галимова, Ю. П. Переведенцев, Г. А. Яманаев // Вестник ВГУ. Серия «География. Геоэкология». – 2019. – № 3. – С. 29–39.
5. Черенкова, Е. А. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи / Е. А. Черенкова, А. Н. Золотокрылин // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2016. – № 2. – С. 79–94. – DOI: 10.21513/2410-8758-2016-2-79-94.
6. Задорнова, О. И. Сравнительная характеристика зарубежных индексов оценки засух по основным зерносеющим субъектам европейской территории России / О. И. Задорнова // Труды Главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова. – 2015. – № 578. – С. 126–139.
7. О возможности использования стандартизированного индекса осадков для выявления засух и в прогнозах количественной оценки урожайности зерновых и зернобобовых культур / А. И. Страшная, В. А. Тищенко, О. В. Береза, Н. А. Богомоллова // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2015. – № 357. – С. 81–97.
8. Черенкова, Е. А. Испаряемость в количественных показателях климата / Е. А. Черенкова, Н. А. Шумова // Аридные экосистемы. – 2007. – Т. 13, № 33–34. – С. 55–67.
9. Кайгарадаў, А. І. Клімат БССР, заходняй Беларусі і сумежных краін / А. І. Кайгарадаў. – Мн. : Сельгассектар, 1934. – Т. II. – 274 с.
10. Агроклиматический справочник / под ред. Н. А. Малишевской. – Мн. : Урожай, 1970. – 248 с.
11. Шкляр, А. Х. Климатические ресурсы Белоруссии и их использование в сельском хозяйстве / А. Х. Шкляр. – Мн. : Выш. шк., 1973. – 430 с.
12. Оценка влияния урбанизации и мелиорации на климатические, водные, земельные и лесные ресурсы Беларуси : отчет по НИР (заключ.) / Белгидромет. – Мн., 2017. – 132 с. – № ГР 20171431.
13. Шашко, Д. И. Агроклиматическое районирование СССР / Д. И. Шашко. – М. : Колос, 1967. – 335 с.
14. Мировой агроклиматический атлас / под ред. И. А. Гольцберг. – М. ; Л. : Гидрометеиздат, 1972. – 115 с.
15. Адаменко, Т. І. Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату / Т. І. Адаменко. – К. : ВЕГО «МАМА-86», 2014. – 20 с.
16. Семенова, І. Г. Синоптичні та кліматичні умови формування посух в Україні / І. Г. Семенова. – Харків : ФОП Панов А. М.; 2017. – 236 с.
17. Агроклиматическое районирование сельскохозяйственных культур в Северном Казахстане / С. С. Байшоланов, А. Р. Жакиева, М. С. Габбасова, Д. А. Чернов // Гидрометеорология и экология. – 2017. – № 3. – С. 17–28.

18. Бровка, Ю. А. Изменение гидротермического коэффициента на территории Беларуси и повторяемости экстремальных условий увлажнения в период потепления климата / Ю. А. Бровка, И. В. Буяков // Природопользование. – 2020. – № 2. – С. 5–18.
19. Пространственно-временные изменения почвенных засух на территории Белорусского Полесья в условиях современного изменения климата / В. И. Мельник, Н. Г. Пискунович, И. В. Буяков [и др.] // Природные ресурсы. – 2021. – № 1. – С. 15–21.
20. Данилович, И. С. Повторяемость засух на территории Беларуси в связи с атмосферной циркуляцией в Атлантико-Европейском секторе / И. С. Данилович, Ю. А. Гледко, И. В. Тарасевич // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 9. – С. 61–71. – DOI: 10.52002/0130-2906-2023-9-61-71.
21. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд., доп. – Мн. : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
22. Червань, А. Н. Оценка и внутрирегиональные различия уязвимости почв сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья к засухам в условиях потепления климата / А. Н. Червань, В. И. Мельник, В. М. Яцухно // Доклады НАН Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 4. – С. 444–453.
23. Мельник, В. И. Оценка увлажнения почв сельскохозяйственных земель Белорусского Поозерья в условиях современного изменения климата / В. И. Мельник, И. В. Буяков, Т. Г. Шумская // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 15–21.
24. Мельник, В. И. К вопросу изучения засух в Беларуси / В. И. Мельник, В. М. Яцухно // Географія : навук.-метад. часопіс. – 2023. – № 6. – С. 9–21.
25. Лысенко, С. А. Оценка проявления засух на сельскохозяйственных землях Белорусского Поозерья с использованием данных дистанционного зондирования Земли / С. А. Лысенко, И. В. Буяков, В. И. Мельник // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 19–35.
26. Юдыцкая, К. С. Использование данных дистанционного зондирования для оценки условий увлажнения территории Брестской области / К. С. Юдыцкая, В. И. Мельник // Природная среда Полесья и научно-практические аспекты рационального ресурсопользования : сб. науч. работ XII Междунар. науч. конф., 8–10 окт. 2025 г., Брест / Полесский аграрно-экологический институт ; редкол.: Н. В. Михальчук (гл. ред.) [и др.]. – Брест : Альтернатива, 2025. – С. 157–160.
27. Бровка, Ю. А. Особенности атмосферного увлажнения на территории Беларуси в летний период при современном изменении климата / Ю. А. Бровка // Природные ресурсы. – 2024. – № 2. – С. 5–16.
28. Сумак, Е. Н. Обзор современных методов исследования и мониторинга засух / Е. Н. Сумак // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2024. – № 2. – С. 91–106.
29. Лысенко, С. А. Изменение климата Беларуси: анализ, прогноз, адаптация (аналитическая записка) / С. А. Лысенко ; НАН Беларуси, Институт природопользования. – Мн., 2025. – 71 с.
30. Лысенко, С. А. Оценки современных изменений биоклиматических параметров почвенно-растительного покрова Гомельской области / С. А. Лысенко, М. А. Хитриков // Природные ресурсы. – 2024. – № 2. – С. 17–28.
31. World Atlas of Desertification. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2018. – 248 p.

References

1. Gringof I. G. *Osnovy sel'skohozyajstvennoj meteorologii Tom 1. Potrebnost' sel'skohozyajstvennykh kul'tur v agrometeorologicheskikh usloviyakh i opasnye dlya sel'skohozyajstvennogo proizvodstva pogodnye usloviya* [Fundamentals of agricultural meteorology. Vol. 1. The need of agricultural crops in agrometeorological conditions and dangerous weather conditions for agricultural production]. Obninsk, FGBU VNIIGMI-MCD, 2011, 808 p. (in Russian)
2. Cherenkova E. A. *Kolichestvennye ocenki atmosferykh zasuh v federal'nykh okrugakh evropejskoj territorii Rossii* [Quantitative estimates of atmospheric droughts in the federal districts of the European territory of Russia]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya = News of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2013, no 6, pp. 76–85. (in Russian)
3. Vasil'ev D. Yu., Vodopyanov V. V., Semenov V. A., Chibilev A. A. *Ocenka tendencij izmeneniya zasushlivosti dlya territorii Yuzhnogo Urala v period 1960–2019 gg. s ispol'zovaniem razlichnykh metodov* [Assessment of trends in aridity for the territory of the Southern Urals in the period 1960–2019 using various methods]. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle = Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*, 2020, vol. 494, no. 1, pp. 91–96. (in Russian)
4. Galimova R. G., Perevedencev Yu. P., Yamanaev G. A. *Agroklimaticheskie resursy Respubliki Bashkortostan* [Agroclimatic resources of the Republic of Bashkortostan]. *Vestnik VGU. Seriya Geografiya. Geoekologiya = Bulletin of the VSU. Geography series. Geoecology*, 2019, no. 3, pp. 29–39. (in Russian)
5. Cherenkova E. A., Zolotokrylin A. N. *O sravnimosti nekotorykh kolichestvennykh pokazatelej zasuhi* [On comparability of some quantitative indicators of drought]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*, 2016, no. 2, pp. 79–94. – DOI: 10.21513/2410-8758-2016-2-79-94. (in Russian)

6. Zadornova O. I. *Sravnitel'naya harakteristika zarubezhnyh indeksov ocenki zasuh po osnovnym zernoseyushchim sub'ektam evropejskoj territorii Rossii* [Comparative characteristics of foreign drought assessment indices for the main grain-growing regions of the European territory of Russia]. *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii imeni A. I. Voejkova* [Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov], 2015, vol. 578, pp. 126–139. (in Russian)
7. Strashnaya A. I., Tishchenko V. A., Bereza O. V., Bogomolova N. A. *O vozmozhnosti ispol'zovaniya standartizirovannogo indeksa osadkov dlya vyyavleniya zasuh i v prognozah kolichestvennoj ocenki urozhajnosti zernovyh i zernobobovyh kul'tur* [On the possibility of using a standardized precipitation index to identify droughts and in forecasts for quantifying grain and leguminous crop yields]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii* [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation], 2015, vol. 357, pp. 81–97. (in Russian)
8. Cherenkova E. A., Shumova N. A. *Isparyaemost' v kolichestvennyh pokazatelyah klimata* [Evaporation in quantitative terms of climate] *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*, 2007, vol. 13, no. 33–34, pp. 55–67. (in Russian)
9. Kajgaradau A. I. *Klimat BSSR, zahodnyaj Belarusi i sumezhnyh krain. T. II* [Climate of the BSSR, Western Belarus and neighboring countries. Vol. II]. Minsk, Sel'gassektor Publ., 1934, 274 p. (in Belarussian)
10. *Agroklimaticheskij spravochnik* [Agroclimatic reference]. Minsk, Urozhaj Publ., 1970, 248 p. (in Russian)
11. Shklyar A. H. *Klimaticheskie resursy Belorussii i ih ispol'zovanie v sel'skom hozyajstve* [Climatic resources of Belarus and their use in agriculture]. Minsk, Vyshejschaya Shkola Publ., 1973, 430 p. (in Russian)
12. *Ocenka vliyaniya urbanizacii i melioracii na klimaticheskie, vodnye, zemel'nye i lesnye resursy Belarusi*. [Assessment of the impact of urbanization and land reclamation on the climatic, water, land and forest resources of Belarus]. *Otchet o NIR* [Research report]. Belgidromet, Minsk, 2017, 132 p. (in Russian)
13. Shashko, D. I. *Agroklimaticheskoe rajonirovanie SSSR* [Agroclimatic zoning of the USSR]. Moskva, Kolos Publ., 1967, 335 p. (in Russian)
14. *Mirovoj agroklimaticheskij atlas* [The World agroclimatic Atlas]. Moskva ; Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, 115 p. (in Russian)
15. Adamenko T. I. *Agroklimatichne zonuvannya teritorii Ukraini z vrahuvannyam zmini klimatu* [Agroclimatic zoning of the territory of Ukraine, taking into account climate change], Kyiv, VEGO "MAMA-86" Publ., 2014, 20 p. (in Ukrainian)
16. Semenova I. G. *Sinoptichni ta klimatichni umovi formuvannya posuh v Ukraini* [Synoptic and climatic conditions of drought formation in Ukraine]. Harkiv, FOP Panov A. M. Publ., 2017, 236 p. (in Ukrainian)
17. Bajsholanov S. S., Zhakieva A. R., Gabbasova M. S., Chernov D. A. *Agroklimaticheskoe rajonirovanie sel'skohozyajstvennyh kul'tur v Severnom Kazahstane* [Agroclimatic zoning of agricultural crops in Northern Kazakhstan] *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*, 2017, no. 3, pp. 17–28. (in Russian)
18. Brovka Yu. A., Buyakov I. V. *Izmenenie gidrotermicheskogo koefficienta na territorii Belarusi i povtoryaemosti ekstremal'nyh uslovij uvlazhneniya v period potepleniya klimata* [Changes in the hydrothermal coefficient on the territory of Belarus and the recurrence of extreme humidification conditions during the period of climate warming]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2020, no. 2, pp. 5–18. (in Russian)
19. Mel'nik V. I., Piskunovich N. G., Buyakov I. V., Yacuhno V. M., Shumskaya T. G. *Prostranstvenno-vremennye izmeneniya pochvennyh zasuh na territorii Belorusskogo Poles'ya v usloviyah sovremennogo izmeneniya klimata* [Spatial and temporal changes in soil droughts in the territory of the Belarusian Polesie under the conditions of modern climate change] *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2021, no 1, pp. 15–21. (in Russian)
20. Danilovich I. S., Gledko Yu. A., Tarasevich I.V. *Povtoryaemost' zasuh na territorii Belarusi v svyazi s atmosfernoj cirkulyaciej v Atlantiko-Evropejskom sektore* [Recurrence of droughts in Belarus due to atmospheric circulation in the Atlantic-European sector]. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2023, no 9, pp. 61–71, DOI: 10.52002/0130-2906-2023-9-61-71. (in Russian)
21. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V.I *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, possibilities of regulation]. Minsk, Enciklopediks Publ., 2020, 264 p. (in Russian)
22. Chervan' A. N., Mel'nik V. I., Yacuhno V. M. *Ocenka i vnutrireional'nye razlichiya uyazvimosti pochv sel'skohozyajstvennyh zemel' Belorusskogo Poles'ya k zasuham v usloviyah potepleniya klimata* [Assessment and intra-regional differences in the vulnerability of agricultural soils of the Belarusian Polesie to droughts in the context of climate warming]. *Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 4, pp. 444–453. (in Russian)
23. Mel'nik V. I., Buyakov I. V., Shumskaya T. G. *Ocenka uvlazhneniya pochv sel'skohozyajstvennyh zemel' Belorusskogo Poozer'ya v usloviyah sovremennogo izmeneniya klimata* [Assessment of soil moisture in agricultural lands of the Belarusian Lake district in the context of modern climate change]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 15–21. (in Russian)
24. Mel'nik V. I., Yacuhno V. M. *K voprosu izucheniya zasuh v Belarusi* [On the issue of studying droughts in Belarus]. *Geografiya: navukova-metadychny chasopis = Geography: Scientific and Methodological Journal*, 2023, no. 6, pp. 9–21. (in Russian)

25. Lysenko S. A., Buyakov I. V., Mel'nik V. I. *Ocenka proyavleniya zasuh na sel'skohozyajstvennyh zemlyah Belorusskogo Poozer'ya s ispol'zovaniem dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli* [Assessment of the manifestation of droughts on agricultural lands of the Belarusian Lake district using remote sensing data]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2025, no. 2, pp.19–35. (in Russian)
26. Yudytskaya K. S., Mel'nik V. I. *Ispol'zovanie dannyh distancionnogo zondirovaniya dlya ocenki uslovij uvlazhneniya territorii Brestskoy oblasti* [Using remote sensing data to assess the humidification conditions of the Brest region] XII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya "Prirodnaya sreda Poles'ya i nauchno-prakticheskie aspekty racional'nogo resursopol'zovaniya" [XII International Scientific Conference "Natural environment of Polesie and scientific and practical aspects of rational resource management"], Brest, 2025, pp.157–160. (in Russian)
27. Brovka Yu. A. *Osobennosti atmosfernogo uvlazhneniya na territorii Belarusi v letnij period pri sovremennom izmenenii klimata* [Features of atmospheric humidification on the territory of Belarus in the summer period with modern climate change]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2024, no. 2, pp. 5–16. (in Russian)
28. Sumak E. N. *Obzor sovremennyh metodov issledovaniya i monitoringa zasuh* [Review of modern methods of drought research and monitoring]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya. = Journal of the Belarusian State University. Geography. Geology*, 2024, no. 2, pp. 91–106. (in Russian)
29. Lysenko S. A. *Izmenenie klimata Belarusi: analiz prognoz adaptatsiya* (analiticheskaya zapiska) [Climate change in Belarus: analysis forecast adaptation (analytical note)]. *Nacional'naya akademiya nauk Belarusi, Institut prirodopol'zovaniya NAN Belarusi* [National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus], Minsk, 2025, 71 p. (in Russian)
30. Lysenko S. A. Hitrikov M. A. *Ocenki sovremennyh izmenenij bioklimaticheskikh parametrov pochvenno-rastitel'nogo pokrova Gomel'skoy oblasti* [Estimates of modern changes in the bioclimatic parameters of the soil and vegetation cover of the Gomel region]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2024, no. 2, pp.17–28. (in Russian)
31. World Atlas of Desertification. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2018, 248 p.

Информация об авторах

Мельник Виктор Иванович – ведущий научный сотрудник, кандидат географических наук, доцент, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: v.melnik2016@mail.ru

Юдыцкая Ксения Сергеевна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kseniya.yudytskaya@gmail.com

Information about the authors

Viktar I. Melnik – Ph. D. (Geography), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: v.melnik2016@mail.ru

Kseniya S. Yudytskaya – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kseniya.yudytskaya@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-55-70>
УДК 631.95(476)

Поступила в редакцию 23.03.2026
Received 23.03.2026

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО ПОЧВЕННО-АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА АГРОЛАНДШАФТОВ БЕЛАРУСИ

А. А. Сазонов

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Комплексная агроэкологическая оценка позволяет рационализировать использование природных ресурсов, определить возможности адаптации сельского хозяйства к природным условиям и найти баланс между интенсификацией и экологизацией. В работе представлена методика комплексной оценки почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов Беларуси на основе статистического анализа их характеристик. В основе методики лежит база геоданных, включающая агроэкологические характеристики 1316 агроландшафтов страны. Последовательные факторный и регрессионный анализы позволяют обоснованно сократить число переменных, составить уравнения регрессии для урожайности группы зерновых и зернобобовых культур для периода 1995–2024 гг. с пятилетними интервалами и рассчитать индекс почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов (ИПАП). Наиболее высокий потенциал отмечается на Гродненской возвышенности, где составляет 112,6 пункта индекса, наиболее низкий – на Нещердо-Городокской возвышенности – 55,0 пункта индекса.

Ключевые слова: агроэкологическая оценка; агроэкологический потенциал; агроландшафты; регрессионный анализ; зерновые культуры.

Для цитирования. Сазонов А. А. Оценка современного почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов Беларуси // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 55–70.

ASSESSMENT OF THE MODERN SOIL AND AGROECOLOGICAL POTENTIAL OF AGRICULTURAL LANDSCAPES OF BELARUS

A. A. Sazonau

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. Comprehensive agroecological assessment makes it possible to rationalize the use of natural resources, identify opportunities for adapting agriculture to natural conditions, and find a balance between intensification and ecologization. The paper presents a methodology for the comprehensive assessment of the soil-agroecological potential of agricultural landscapes in Belarus, based on statistical analysis of their characteristics. The methodology is based on a geodatabase that includes agroecological characteristics of 1316 agricultural landscapes across the country. Sequential factor and regression analyses allow for a justified reduction in the number of variables, the development of regression equations for the yield of grain and leguminous crops for the period 1995–2024 with five-year intervals, and the calculation of the index of soil-agroecological potential of agricultural landscapes (ISAP). The highest potential is observed in the Grodno Upland, where it amounts to 112.6 index points, while the lowest is found in the Neshcherdo-Gorodokskaya Upland, with 55.0 index points.

Keywords: agroecological assessment; agroecological potential; agricultural landscapes; regression analysis; grain crops.

For citation. Sazonau A. A. Assessment of the modern soil and agroecological potential of agricultural landscapes of Belarus. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 55–70.

Введение.

Теоретические подходы к агроэкологической оценке. Комплексная агроэкологическая оценка позволяет рационализировать использование природных ресурсов, определить возможности адаптации сельского хозяйства к природным условиям, поиска баланса между интенсификацией и экологизацией. Результаты оценки необходимо учитывать при перспективном размещении посевов и оптимизации структуры посевных площадей сельскохозяйственных культур, прогнозировании и изменений потенциала по причине изменения климата и проведения мелиоративных мероприятий [1].

Изменяющиеся климатические условия, интенсификация сельскохозяйственного производства и повышение его наукоемкости требуют поиска новых подходов к оценке ресурсного потенциала агроландшафтов, что обуславливает актуальность настоящего исследования, цель которого – представить

методику комплексной оценки почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов Беларуси на основе статистического анализа их характеристик с использованием ГИС-технологий и баз геоданных.

Применительно к агроландшафтам использование урожайности сельскохозяйственных культур как интегрального показателя степени соответствия природных условий требованиям их выращивания можно считать общепринятым. Согласно подходу к оценке природных условий Л. Г. Раменского «...единственным, прямым и достоверным оценщиком природных условий служит сама растительность» [2, 3]. А. Н. Витченко рассматривает продуктивность сельскохозяйственных культур как интегральный показатель «превращения вещества и энергии в ландшафтах, который отражает совокупное влияние различных составляющих энергетического, водного и биогеохимического балансов, дает возможность количественно оценить их роль и степень участия в формировании агроэкологического потенциала геосистем» [1].

В оценке эффективности аграрного производства известно два подхода: техническая эффективность и аллокативная эффективность [4]. Первая определяется по уровню использования имеющегося агроресурсного потенциала для максимизации выхода продукции при заданных факторах производства, вторая – по уровню соотношения между используемыми ресурсами для минимизации затрат при данных ценах на продукцию.

Различают агроэкологическую и агрохозяйственную оценки потенциала почвенно-земельных ресурсов агроландшафта [5]. *Агроэкологическая оценка* – это анализ факторов природной среды, оказывающих наиболее сильное влияние на интенсивное сельскохозяйственное использование типов земель. *Агрохозяйственная оценка* – это кадастровая оценка сельскохозяйственных земель и степень окультуренности почв в границах агроландшафта (землепользования).

Природный агропотенциал предопределяет развитие сельского хозяйства, складывается из всех элементов природного комплекса, оцениваемых с точки зрения благоприятности ведения сельского хозяйства, и в научном сообществе определяется по-разному [6]. Впервые понятие «природный потенциал ландшафта» для интегральной оценки введено Н. А. Солнцевым. В. В. Рюмин выявляет природный потенциал геосистем через их компоненты и свойства, «определяющие возможности и условия производственной деятельности, жизни и отдыха людей с учетом необходимости их восстановления и охраны» [6], включая как исходные качества природы, так и приобретенные в результате антропогенных изменений.

Подходы к агроэкологической оценке земель и почв агроландшафтов сложны и разнообразны, могут значительно отличаться в разных странах. В качестве объекта оценки выступают как земли, в том числе земли сельскохозяйственного назначения [7, 8], так и почвы [9–12], и структура почвенного покрова отдельных территорий.

К одной из разновидностей агроэкологической оценки относится бонитировка и агропроизводственная группировка почв, направленная на выявление и ранжирование групп почв по степени пригодности под определенные культуры, или объединение по потребности в гидротехнической и химической мелиорации. Критерии группировки различны, и могут включать в себя не только характеристики почв, но и рельефа [13].

Наибольшее распространение за рубежом получил разработанный в 1970-х годах Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО) метод рейтинговой оценки пригодности земель для сельскохозяйственного использования по четырем категориям пригодности, согласно которому «каждый оценочный показатель получает определенный балл (рейтинг) и рассчитывается индекс оценки земли как среднеарифметическое из общего числа баллов» [7].

В Беларуси бонитировка почв – основа оценки земель, целью которой является определение пригодности почв для возделывания различных культур, рациональное размещение производства, планирование урожайности и определение закупочных цен на продукцию. Разработаны частные агропроизводственные группировки почв Беларуси по пригодности для возделывания отдельных сельскохозяйственных культур [9]. Почва, ее плодородие, лежит в основе кадастровой оценки сельскохозяйственных земель страны.

Бонитировка почв и оценка сельскохозяйственных земель Беларуси сегодня ставит своей целью определение показателей, характеризующих плодородие, местоположение, технологические свойства сельскохозяйственных земель как средства производства в сельском хозяйстве, а также определение кадастровой стоимости сельскохозяйственных земель. Данный подход подвергается критике, поскольку само по себе плодородие почвы является «лишь потенциальной способностью почвы участвовать в создании урожая в рамках метаболизма агробиоценоза» и в конечном счете для разных культур неодинаково [14].

Существенным недостатком подходов к бонитировке и агропроизводственной группировке почв является слабая связь почвенных условий с другими агроэкологическими условиями, «абсолютизация почвенного критерия» [7]. Так, В. И. Кирюшин утверждает, что «традиционные агропроизводственные

группировки почв, методы картографирования и бонитировки почв, разрабатывавшиеся для условий экстенсивного земледелия, ограничены и малопригодны в связи с недостаточным отражением структуры почвенного покрова, рельефа, литологических и гидрогеологических условий, агроэкологических параметров почв и других характеристик агроландшафтов» [15]. Применительно к агропроизводственной группировке почв Беларуси отмечаются низкий учет требований практики, отсутствие характеристики производительной способности почв, условий залегания по рельефу, размеров элементарных почвенных ареалов (ЭПА) [16].

Для агроэкологической оценки земель исследователи нередко стремятся рассчитать интегральный показатель агроэкологического потенциала или состояния объекта исследования, методика оценки которого часто заключается в использовании бальной оценки и ввода поправочных коэффициентов. Определение весов для коэффициентов может быть как математическим (статистическим), так и экспертным. Среди последних можно отметить работы А. О. Белоусова, где в основе оценки весовых коэффициентов лежит метод анализа иерархий, а интегральный показатель рассчитывается как сумма взвешенных показателей [8].

Применяется как интегральная оценка агроэкологического потенциала [17], так и использование узкого набора критериев, или попытка выделения одного ведущего фактора, такого как рельеф, климат или почвы [2, 18]. Необходимость интегральной оценки обусловлена тем, что частные индикаторы не дают комплексного представления об объекте исследования [19].

Одним из подходов к интеграции почвенных и климатических условий в одном индексе является почвенно-экологический индекс (ПЭИ) [20], выражающийся в баллах продуктивности основных сельскохозяйственных культур, позже модифицированный в почвенно-агроклиматический индекс (ПАКИ). Результативность данного подхода, опирающегося на различные условности и допущения, оценивается как невысокая [7].

Я. В. Рейнгард и О. В. Нежевляк применяют метод, «основанный на определении и сопоставлении экологических, агроэкологических и антропогенных элементов ландшафтов с учетом их положительного или отрицательного влияния на условия произрастания сельскохозяйственных культур» [10, 21], находя частное от суммы факторов, оказывающих положительное воздействие на культуры, и поправочных коэффициентов на отрицательное воздействие.

В целом интегральная оценка земель сегодня теряет актуальность, становясь более дифференцированной [7]: современные агротехнологии смягчают лимитирующие условия, позволяя увеличивать урожаи даже на почвах с невысокими бонитировочными показателями. Тем не менее она сохраняет фундаментальное значение, поскольку позволяет обеспечить сопоставимость территорий, унификацию критериев оценки и целостное представление о функционировании агроландшафтов как систем.

Агроэкологическая оценка земель, основанная на адаптивно-ландшафтном подходе к земледелию, развивается в работах В. И. Кирюшина. Данный подход заключается в идентификации агрономически значимых характеристик в соответствии с требованиями культур и агротехнологий, определении ландшафтных связей, особенностей энерго- и массопереноса и ландшафтно-геохимических потоков, соотнобразуется с системой агроэкологической оценки сельскохозяйственных культур, и состоит из четырех этапов: ландшафтно-экологического анализа территории, агроэкологической оценки почв, агроэкологической типизации и классификации земель, создания агрогеоинформационных систем по агроэкологической оценке земель [22].

В Беларуси работы, посвященные анализу и оценке агроэкологического состояния ландшафтов, земель и почв, выполняются достаточно давно. Значительный вклад в разработку данной проблемы внесли сотрудники Белорусского государственного университета: В. М. Яцухно [4], А. Н. Витченко [1], Ю. П. Качков и О. Ю. Панасюк [23], М. Н. Брилевский [24] и др. В Институте почвоведения и агрохимии НАН Беларуси разработаны подходы к определению потенциала почвенно-земельных ресурсов на основе типологии земель [25], сформированы подходы к разработке адаптивно-ландшафтных систем земледелия [26]. Оценка почвенно-земельного потенциала на основе структуры почвенного покрова отдельных районов страны проводит А. Н. Червань, разделяя потенциал на агроэкологическую и агрохозяйственную составляющие [27] и выделяя пять групп агроэкологического потенциала – от очень низкого до очень высокого.

Факторы агроэкологической оценки. В процессе агроэкологической оценки необходимо обоснованно подходить к выбору факторов и учитывать наиболее важные (критические, лимитирующие) из них. В случае если все природные факторы являются критическими, это может указывать на исчерпание естественных условий для размещения и продуцирования объекта оценки, а дальнейшее использование земель возможно с дополнительными затратами на восстановление природно-ресурсного потенциала земель или переходом на виды использования, где критические показатели не играют существенной роли [28].

Количество оцениваемых факторов зависит от уровня интенсификации производства [22]. Анализируя литературные источники, можно выделить десять групп, включающих более 160 факторов, применяемых в агроэкологической оценке земель:

1) почвенные: гранулометрический состав, почвенно-компонентный состав, водный режим, заболоченность, почвообразующие и подстилающие породы, минералогический состав, структурное состояние, слитогенез, мощность встречающихся эоловых отложений, запасы продуктивной влаги и влагоемкость, водопроницаемость, водоподъемная способность [7–9, 11, 21–23, 29];

2) структура почвенного покрова: контрастность, сложность, неоднородность [7, 21];

3) климатические [7, 21, 22, 30]:

– зональные: континентальность климата, широта местности;

– факторы увлажнения: влагообеспеченность, гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) за период с устойчивой температурой выше 10 °С, коэффициент увлажнения, сумма осадков за год и вегетативный период, сумма осадков за зиму, весну, лето, осень, осадки твердые или запас воды в снеге, осадки жидкие, высота снежного покрова, характер выпадения осадков, индекс аридности (AI);

– почвенно-климатические факторы: средняя температура на поверхности почвы, продолжительность безморозного периода, глубина промерзания почвы, даты промерзания и оттаивания почвы, даты устойчивого прогревания почвы до 5 °С и 10 °С на глубине 5 и 10 см, сумма среднесуточных температур почвы выше 10 °С на глубине 5 и 10 см, период нахождения почв под снегом, продолжительность периода открытой поверхности почвы, запасы продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см осенью перед началом сева озимых и в слое 0–100 см весной;

– температурные факторы: температурный режим, среднегодовая температура воздуха, сумма эффективных (активных) температур, сумма температур выше 15 °С, 10 °С и 5 °С за вегетацию, длительность периодов со среднесуточными температурами выше 5 °С, 10 °С и 15 °С, среднемесячные и среднемноголетние температуры июля и января (самого теплого и самого холодного месяцев), абсолютные минимум и максимум температуры, даты прохождения среднесуточных температур через 0 °С, 5 °С, 10 °С и 15 °С весной и осенью, даты первого осеннего и последнего весеннего заморозков среднемноголетние и экстремальные, частота и интенсивность заморозков в мае;

– ветровой режим: годовая роза ветров, средняя скорость ветра в году и в отдельные периоды вегетации, максимальное число дней в году со скоростью ветра более 15 м/с, среднее число дней в году с ветрами более 15 м/с, вероятность скоростей ветра выше 5 м/с в отдельные периоды вегетации; число дней в году со скоростью ветра выше 5 м/с;

– показатели условий перезимовки культур: даты установления и схода снежного покрова, средняя высота снежного покрова, влажность почвы перед промерзанием и установлением устойчивого снежного покрова, вероятность наступления оттепелей, число дней в году с оттепелями, продолжительность оттепелей;

– факторы негативных погодных явлений: вероятность выпадения ливней и сильных дождей в отдельные периоды, количество ливней в год, число дней в году с ливнями и сильными дождями, средневзвешенная интенсивность ливней; число дней с атмосферной засухой (продолжительность засух), вероятность проявления засух в отдельные периоды вегетации, в том числе в июле; среднегодовая продолжительность пыльных бурь, среднее число пыльных бурь в год, средняя скорость ветра во время пыльных бурь, эрозионная способность пыльных бурь, среднее многолетнее число метелей в году; вероятность суховея в отдельные периоды; число дней в году с суховеями; длительность суховея;

4) геоморфологические и морфометрические: формы мезо- и микрорельефа, коэффициент горизонтального расчленения, коэффициент вертикального расчленения, форма, кривизна, крутизна, экспозиция, длина склонов, коэффициент овражности и плотности оврагов [7, 18, 22, 29, 31];

5) геологические и гидрогеологические: гидрогеологический режим, уровень, состав, проточность грунтовых вод, тектоническое строение, генетические типы отложений, геологические фации и фациальные комплексы, поемность [7, 22, 29];

6) экологические: эрозионное состояние, фактическая и потенциальная эродированность, деградация земель, доля подверженных дефляции земель, радиационное загрязнение, индекс разнообразия Симпсона (при оценке биоразнообразия), соотношение типов земель (угодий), эколого-хозяйственный баланс, коэффициенты относительной напряженности, естественной защищенности территории, коэффициента экологической стабилизации, содержание тяжелых металлов, содержание радионуклидов [8, 11, 21–23, 32];

7) агрохимические: емкость катионного обмена, кислотность (pH_{KCl}), содержание гумуса и мощность гумусового горизонта, содержание подвижных форм фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O), актуальная щелочность, потенциальная кислотность, гипсоносность, солонцеватость, засоленность [7–9, 22];

8) агрохозяйственные и мелиоративные: окультуренность, уровень плодородия, конфигурация, контурность, удельный периметр рабочих участков, освоенность территории, распаханность, каменистость,

скелетность, порозность, пористость, плотность сложения, наличие плужной подошвы, пластичность, липкость, набухание, усадка, связность, твердость (или сопротивление пенетрации) и удельное сопротивление при обработке, закустаренность, доля мелиорированной пашни, площадь пригодной для сельскохозяйственного использования пашни, залесенность (лесистость), доля естественных сенокосов, доля естественных пастбищ [7, 8];

9) социальные: транспортная инфраструктура, демографические характеристики [8];

10) экономические: кадастровая стоимость, инвестиции в сельское хозяйство [8].

С точки зрения лимитирующего влияния на возделывание сельскохозяйственных культур и возможностей их преодоления, агроэкологические факторы разделяются на четыре группы: управляемые, регулируемые, ограниченно регулируемые и нерегулируемые, а по характеру природных ограничений пригодности земель для возделывания конкретных культур или групп культур и характеру мероприятий по их преодолению или адаптации ранжируются по шести категориям [22].

Таким образом, для почвенно-агроэкологической оценки агроландшафтов Беларуси предлагается использовать группы климатических, почвенных, геоморфологических и морфометрических, экологических, агрохимических, агрохозяйственных и мелиоративных факторов.

Методика и материалы исследования. В общем виде предлагаемая методика количественной оценки почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов включает четыре этапа (рис. 1).

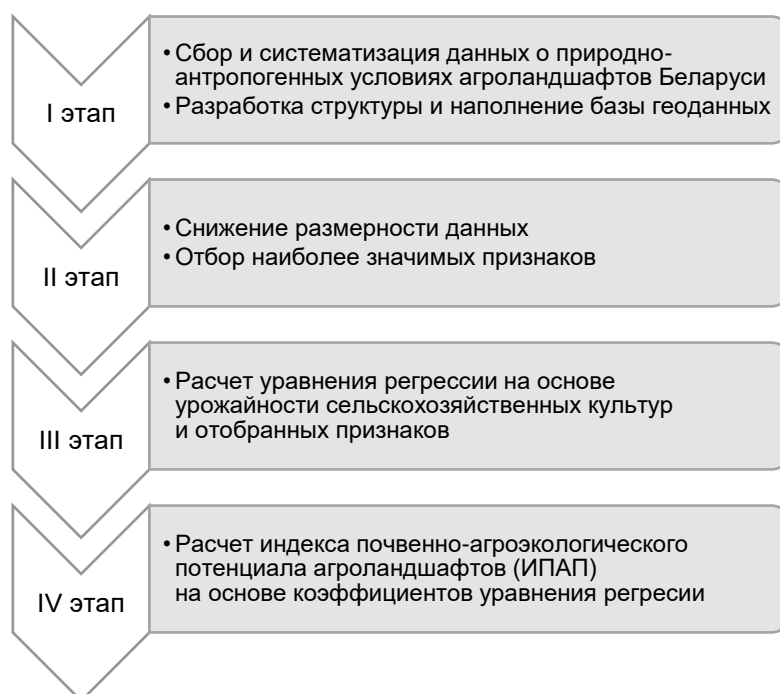


Рис. 1. Концептуальная модель оценки почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов

Fig. 1. The conceptual model for assessing the soil-agroecological potential of agricultural landscapes

На первом этапе оценки осуществляются сбор и систематизация данных об агроландшафтах для последующего анализа. В основе предлагаемой методики оценки почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов Беларуси лежит база данных, структура и методика создания которой представлена в наших публикациях [33]. Отметим, что на данном этапе важно охватить как можно большее число исходных независимых переменных (признаков), что в дальнейшем позволит обоснованно отобрать из них наиболее важные. В работе анализируется 127 исходных признаков по 1316 агроландшафтам – операционно-территориальным единицам исследования (ОТЕ).

Для целей настоящего исследования под *агроландшафтом* понимается пространственно организованная природно-хозяйственная геосистема, функционирующая в границах современного сельскохозяйственного землепользования (как элементарная информационная ОТЕ), характеризующаяся сочетанием пространственно-сопряженных и функционально однородных природно-территориальных комплексов, систем использования земель и примерно равным уровнем энергетических затрат, отражающих уровень интенсивности сельскохозяйственного производства [33]. Границами современного землепользования выступают границы сельскохозяйственных предприятий Беларуси, которые

рассматриваются как локальный центр концентрации и управления антропогенной энергией, тогда как окружающий природный ландшафт выступает пространством ее трансформации и диссипации. Границы сельскохозяйственного предприятия, таким образом, определяют пределы управляемого антропогенного воздействия на ландшафт, направленного на достижение максимальной сельскохозяйственной продуктивности при заданном уровне интенсивности землепользования.

На втором этапе оценки осуществляется снижение размерности данных и статистически обоснованный отбор показателей – предикторов уравнения регрессии. В качестве предикторов из исходных 127 отобрано 24 признака, выделенных на основе корреляционного и компонентного (факторного) анализа методом главных компонент в соответствии с методикой, представленной в работах [33, 34]. Отобранные признаки характеризуют природно-антропогенные факторы формирования и функционирования агроландшафтов:

а) агроклиматические факторы (6 признаков): средняя температура января, индекс континентальности, количество осадков за год, продолжительность безморозного периода на почве, продолжительность периода с средней суточной температурой выше 10 °С, ГТК за период с устойчивой температурой выше 10 °С;

б) почвенно-эрозионные факторы (3 признака): длина склонов, общая доля эродированных земель и доля земель с высоким уровнем дефляционной опасности в структуре земельного фонда агроландшафтов;

в) почвенно-экологические факторы (11 признаков) представлены долей в структуре земель агроландшафтов: дерновых заболоченных, зональных типов почв; почв тяжелого гранулометрического состава; переувлажненных почв и гидроморфных почв; почв моренного, водно-ледникового, лёссового и лёссовидного генезиса; почв с однородным и с двухчленным строением профиля; почв с подстилкой связными породами;

г) почвенно-структурные факторы (4 признака): индекс видового разнообразия Маргалефа, индекс дробности ЭПА, дифференциация величины почвенных контуров, коэффициент контрастности почвенного покрова по Ю. К. Юодису.

На третьем этапе оценки производится регрессионный анализ методом множественной линейной регрессии. Отметим, что компонентного анализа по группам признаков может оказаться недостаточно, в таком случае стоит рассмотреть другие методы регрессионного анализа, например метод частичных наименьших квадратов или гребневую регрессию (ridge-регрессию). Расчеты выполнены в программном обеспечении статистической обработки данных IBM SPSS Statistics 26. Исходя из подхода к оценке природных условий через продуктивность сельскохозяйственных культур, в качестве зависимой переменной уравнений регрессии выбрана урожайность сельскохозяйственных культур. В качестве предикторов в нашем исследовании выступают признаки, отобранные на предыдущем этапе, однако могут быть использованы и собственные значения компонент.

На четвертом этапе оценки осуществляется количественная оценка потенциала агроландшафтов Беларуси, для этого предлагается использовать индекс почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов (ИПАП), рассчитанный на основе значимых коэффициентов уравнений регрессии, собственные значения которых нормированы в шкалу 0...1 методом минимакс.

Расчет ИПАП производится по формуле

$$A = 10 + k + \sum (x_i x_i')^2,$$

где A – индекс почвенно-агроэкологического потенциала; 10 – константа; k – свободный член; x_i – нормированное собственное значение признака i ; x_i' – соответствующий коэффициент уравнения регрессии для признака i .

Константа 10 введена для обеспечения положительных значений индекса, возведение в квадрат – для удобства его интерпретации.

Результаты и их обсуждение. Для примера расчета ИПАП в качестве зависимой переменной нами использованы урожайность группы зерновых и зернобобовых культур по данным Национального статистического комитета Беларуси на период 1995–2024 гг. с пятилетними интервалами и среднегодовая урожайность за тот же период. Выбор культур обусловлен тем, что зерновые и зернобобовые являются основной группой сельскохозяйственных культур Беларуси [35]. Поскольку статистические данные об урожайности культур агрегированы по административным районам, средние значения урожайности использованы для всех ОТЕ исследования, расположенных в соответствующих районах.

Дисперсионный анализ моделей регрессии для каждого временного интервала представлен в табл. 1, анализируя которую можно отметить, что модели регрессии статистически значимы (значимость 0,00 при уровне значимости 0,05). Для всех моделей степени свободы регрессии, остатков и общие составили 24, 1291 и 1315 соответственно.

Таблица 1. Дисперсионный анализ моделей регрессии**Table 1. Analysis of variance of regression models**

Зависимая переменная (урожайность)	Сумма квадратов			Средний квадрат		Критерий Фишера F
	Регрессия	Остатки	Всего	Регрессия	Остатки	
1995 г.	32,03	17,31	49,34	1,34	0,01	99,56
2000 г.	26,89	24,61	51,50	1,12	0,02	58,77
2005 г.	23,31	18,73	42,05	0,97	0,02	66,94
2010 г.	29,17	21,61	50,78	1,22	0,02	72,62
2015 г.	20,93	21,20	42,14	0,87	0,02	53,11
2020 г.	23,51	18,25	41,75	0,98	0,01	69,30
2024 г.	40,44	20,52	60,96	1,69	0,02	106,03
Среднемноголетнее значение	28,06	17,51	45,57	1,17	0,01	86,20

Сумма квадратов регрессии показывает, насколько хорошо модель объясняет вариацию зависимой переменной, остаточная сумма квадратов указывает на вариацию, которую модель не смогла объяснить. Последнюю можно связать, во-первых, с влиянием неучтенных агротехнических факторов – внесения органических и минеральных удобрений, технологий земледелия, а также неблагоприятных погодных явлений в течение года, а во-вторых – с системными ошибками расчета урожайности, ее усреднению по административным районам.

Высокое значение F -статистики (критерий Фишера) указывает на высокую значимость модели, и на то, что модель хорошо подходит для объяснения вариации зависимой переменной во всех периодах.

Табл. 2 позволяет оценить качество модели для каждого временного интервала. R показывает силу линейной связи между предикторами и зависимой переменной. Самая сильная связь отмечается для 2024 г. (0,81), самая слабая – для 2015 г. (0,71). Для среднемноголетнего значения она составляет 0,79, что в целом указывает на сильную или умеренно сильную линейную зависимость.

Таблица 2. Коэффициенты детерминации моделей регрессии**Table 2. Coefficients of determination of regression models**

Зависимая переменная (урожайность)	R	R^2	Скорректиро- ванный R^2	Изменение R^2	Изменение F
1995 г.	0,81	0,66	0,64	0,65	99,56
2000 г.	0,72	0,52	0,51	0,52	58,77
2005 г.	0,74	0,55	0,55	0,55	66,94
2010 г.	0,76	0,57	0,57	0,57	72,62
2015 г.	0,71	0,50	0,49	0,50	53,11
2020 г.	0,75	0,56	0,56	0,56	69,30
2024 г.	0,81	0,66	0,66	0,66	106,03
Среднемноголетнее значение	0,79	0,62	0,62	0,62	86,20

Коэффициент детерминации (R^2) отражает долю вариации зависимой переменной, объясненную моделью. Наибольшее – 0,66 (2024 г.), наименьшее – 0,50 (2015 г.) и среднемноголетнее – 0,62 (62 % вариации) значения указывают на умеренно-высокую объяснительную способность моделей.

Скорректированный R^2 учитывает количество предикторов и размер выборки, предоставляя более консервативную оценку объясненной вариации. Значения скорректированного R^2 близки к R^2 , что говорит об оптимальном количестве предикторов.

Стандартная ошибка показывает среднее отклонение предсказанных значений от наблюдаемых. Наибольшая точность характерна для 1995 г. и среднемноголетних данных, наименьшая – для 2000 г. Стандартная ошибка изменяется в интервале 0,12–0,14.

Изменение R^2 показывает вклад предикторов в объясненную вариацию. Значения совпадают с R^2 . Это указывает на то, что модель включает только значимые предикторы. Изменение F соответствует F -статистике, проверяя значимость добавленных предикторов. Все значения высоки (от 53,11 в 2015 г. до 106,03 в 2024 г.), что подтверждает значимость модели ($p = 0,00$).

Для каждого временного интервала составлены уравнения регрессии, рассчитаны коэффициенты (табл. 3) и почвенно-агроэкологический потенциал агроландшафтов Беларуси (рис. 2).

Таблица 3. Коэффициенты уравнений регрессии почвенно-агроэкологического потенциала

Table 3. Coefficients of regression equations for soil-agroecological potential

Независимая переменная	Зависимая переменная							Сумма квадратов
	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2015 г.	2020 г.	2024 г.	Средне-голетнее значение	
Свободный член	1,05	0,78	1,03	0,45	0,71	0,70	0,74	4,53
Средняя температура января	-1,74	–	–	–	-1,52	-2,28	-1,21	11,99
Индекс континентальности	-3,04	-2,70	-1,64	-2,34	-3,56	-4,90	-3,28	72,10
Количество осадков за год	–	–	–	-0,96	–	–	–	0,91
Продолжительность безморозного периода на почве	-0,77	-0,27	-0,39	–	-0,43	-0,65	-0,41	1,60
Продолжительность периода с средней суточной температурой выше 10 °С	4,11	2,97	1,25	2,01	3,32	5,25	3,36	81,16
ГТК за период с температурой выше 10 °С	-0,49	–	-1,33	0,93	-0,95	–	-0,51	4,02
Длина склонов	-0,42	-0,81	-0,57	–	–	–	–	1,16
Общая доля эродированных земель	2,47	1,95	2,26	1,54	0,65	1,03	1,69	21,72
Земли с высоким уровнем дефляционной опасности	–	-0,54	–	–	-0,42	-0,53	-0,31	0,83
Дерновые заболоченные почвы	–	–	-0,54	–	–	–	–	0,29
Зональные типы почв	-1,59	-1,02	-1,43	–	–	-0,99	-0,83	7,27
Почвы тяжелого гранулометрического состава	-0,28	-0,27	–	–	-0,28	-0,44	-0,30	0,51
Переувлажненные почвы	-0,86	-0,69	-1,55	-0,80	-0,64	-0,81	-0,90	6,10
Гидроморфные почвы	-1,73	-2,12	-2,36	-1,13	-1,12	-1,54	-1,66	20,68
Почвы на моренных отложениях	–	–	0,30	–	–	–	–	0,09
Почвы на водно-ледниковых отложениях	–	-0,15	0,14	-0,13	–	0,18	–	0,09
Почвы на лёссовых и лёссовидных отложениях	0,52	0,36	0,91	0,34	0,74	0,93	0,70	3,23
Почвы с однородным строением профиля	–	0,67	–	0,99	0,96	–	0,49	2,58
Почвы с двухчленным строением профиля	-0,24	–	-0,47	0,29	–	–	–	0,36
Подстиление связными породами	0,20	0,27	0,41	–	–	–	–	0,28
Индекс видового разнообразия Маргалефа	–	–	0,67	–	1,08	1,04	0,69	3,15
Индекс дробности	-3,72	-3,25	-3,90	-2,40	-1,77	-1,89	-2,95	60,75
Дифференциация величины ЭПА	–	-0,57	–	–	-0,45	–	–	0,52
Коэффициент контрастности	–	–	–	–	-0,44	-0,38	–	0,34

Примечание. Статистически незначимые коэффициенты отмечены прочерком.

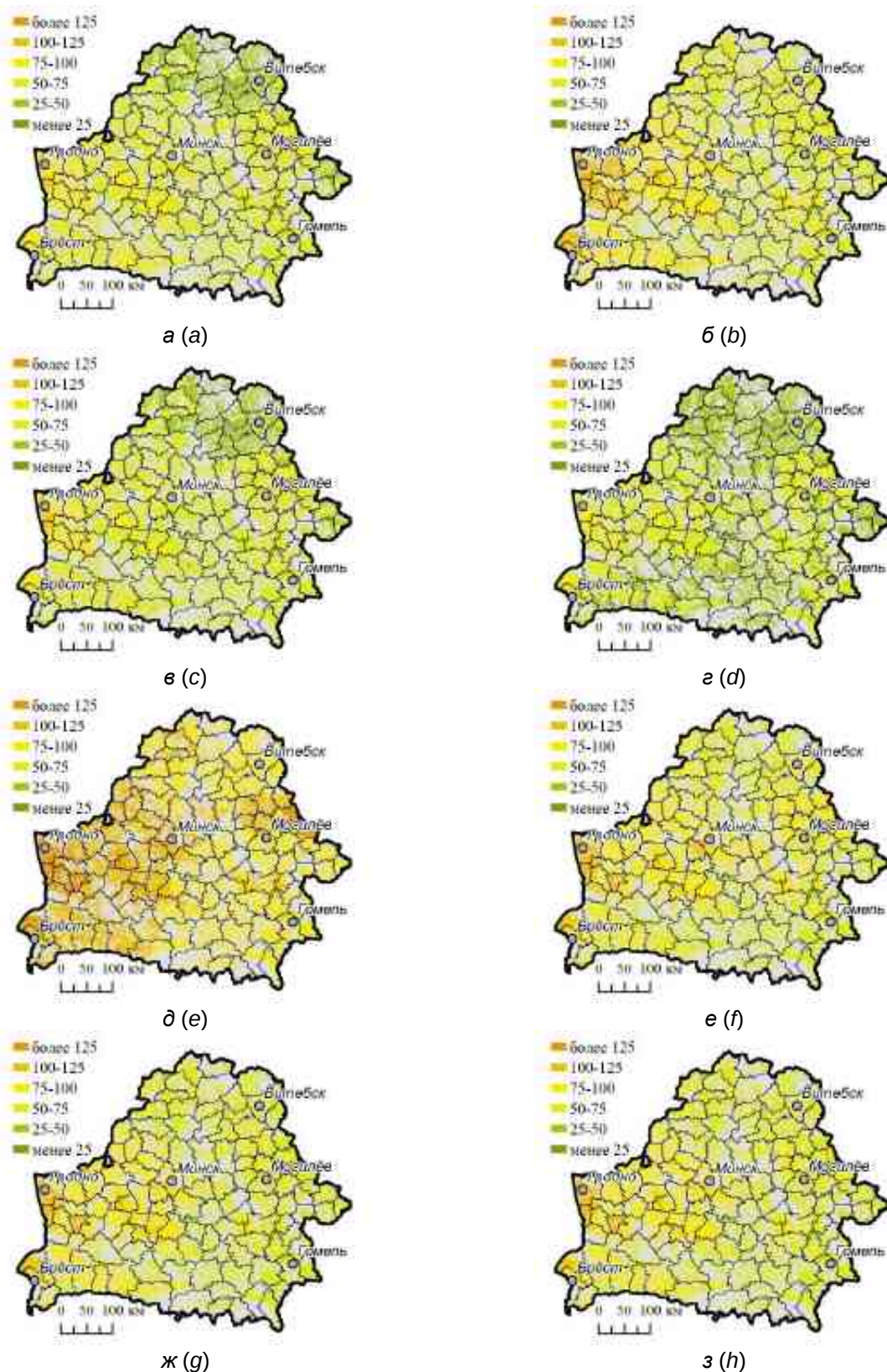


Рис. 2. Индекс почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов Беларуси:
а – 1995 г.; б – 2000 г.; в – 2005 г.; г – 2010 г.; д – 2015 г.;
е – 2020 г.; ж – 2024 г.; з – среднее за период 1995–2024 гг.

Fig. 2. Index of soil and agroecological potential of agricultural landscapes of Belarus:
a – 1995; b – 2000; c – 2005; d – 2010; e – 2015; f – 2020; g – 2024; h – average for 1995–2024

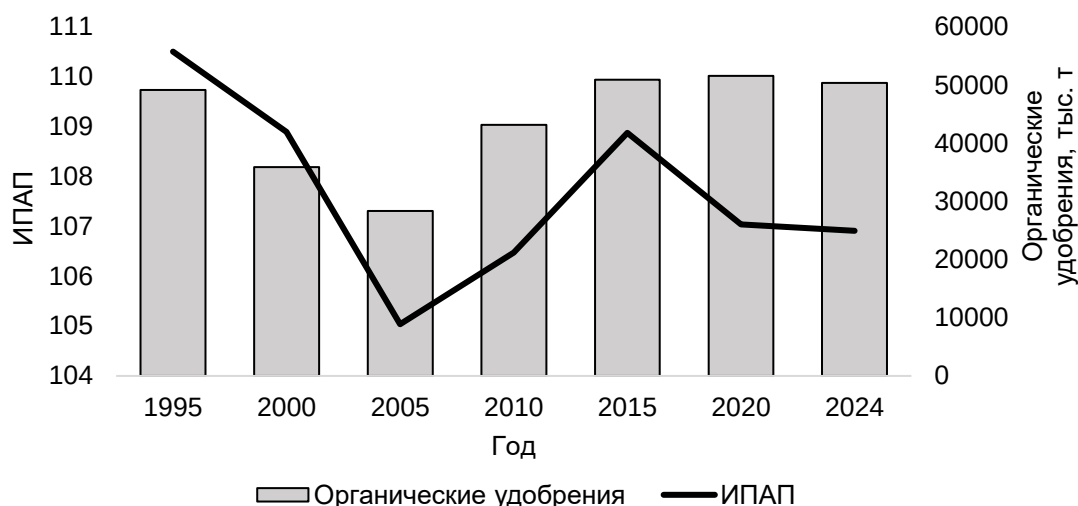


Рис. 3. Динамика среднего по Беларуси индекса почвенно-агроэкологического потенциала агроландшафтов в контексте внесения органических удобрений

Fig. 3. Dynamics of the average for Belarus index of soil-agroecological potential of agricultural landscapes in the context of organic fertilizer application

Установлено, что вне зависимости от года наблюдения статистически устойчивое влияние оказывают следующие группы факторов: климатические – индекс континентальности (стабильно отрицательное влияние), продолжительность периода с температурой выше 10 °С (стабильно положительное влияние); почвенные – переувлажненные и гидроморфные почвы (устойчиво отрицательное влияние), почвы на лёссовых и лёссовидных отложениях (устойчиво положительное влияние); почвенно-гетерогенные – индекс дробности почвенного покрова (устойчиво отрицательное влияние).

Сравнительный анализ регрессионных моделей свидетельствует о наличии устойчивой инвариантной структуры факторов, определяющих пространственно-временную дифференциацию урожайности группы зерновых и зернобобовых сельскохозяйственных культур на территории Беларуси, а также о существенной трансформации роли отдельных факторов во времени.

Сумма квадратов коэффициентов позволяет выявить иерархическую структуру влияния факторов на почвенно-агроэкологический потенциал агроландшафтов и определить устойчивое факторное ядро, отражающее совокупное действие на потенциал агроландшафтов. Системное влияние – сумма квадратов более 60 – оказывают факторы продолжительности периода с средней суточной температурой выше 10 °С, индекс континентальности и индекс дробности почвенного покрова. Значительное влияние – сумма квадратов 20–21 – оказывают лимитирующие факторы эрозийного состояния и гидроморфизма почв. Умеренное влияние – сумма квадратов 6–20 – оказывают факторы условий перезимовки культур (средняя температура января), зональные и переувлажненные почвы. Сумма квадратов коэффициентов остальных факторов сопоставима с суммой квадратов свободного члена – около 4 и менее, и не играет определяющей роли.

Среднегодовое значение ИПАП агроландшафтов в среднем по Беларуси (см. рис. 2, 3) составляет 74,6 пункта индекса. Максимум наблюдается в 2015 г. – в среднем по стране 102,4 пункта ИПАП, абсолютный максимум – 153,4 пункта ИПАП. Минимум наблюдается в 2010 г. – в среднем 52,9 пункта ИПАП, абсолютный минимум по стране – 14,7 пункта ИПАП.

Анализ пространственно-временной динамики ИПАП агроландшафтов Беларуси позволяет выявить ряд тенденций (рис. 2, 3). Снижение уровня ИПАП в 2005 г. до среднего по стране значения 105,0 можно связать с минимальным за весь период наблюдения уровнем внесения органических удобрений в сельскохозяйственных организациях страны (28 млн т, или 3,8 т/га), которые имеют наиболее стабильную связь с урожайностью [36]. После 2015 г. ИПАП демонстрирует снижение – с 108,9 до 106,9 на фоне стабильного внесения органических удобрений и сниженного внесения минеральных, что может быть связано с климатообусловленным снижением урожайности, особенно в южных регионах страны [37].

Почвенно-агроэкологический потенциал агроландшафтов Беларуси проанализирован в разрезе физико-географических районов страны (рис. 4), которые соответствуют схеме районирования Национального атласа Беларуси [38].

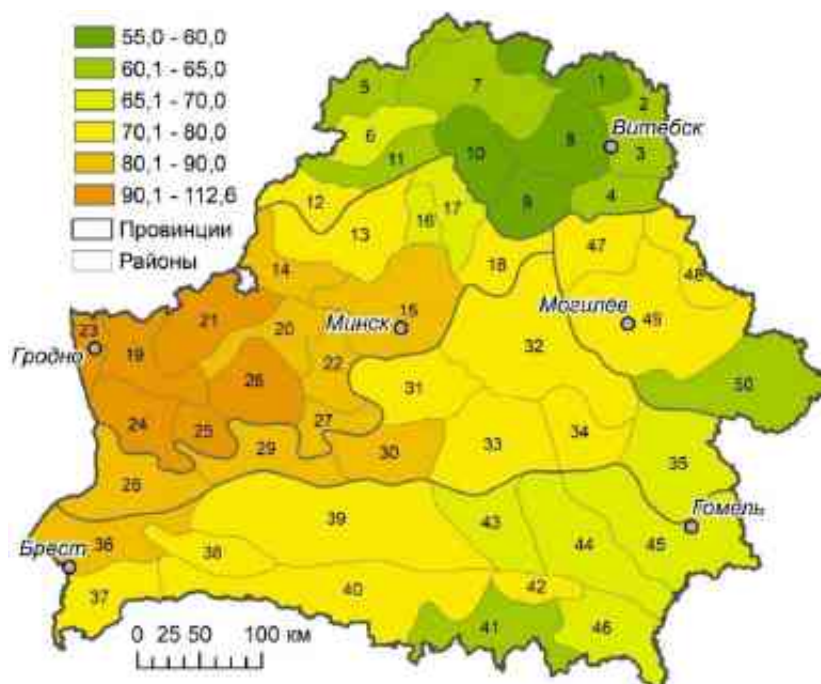


Рис. 4. Среднемноголетний почвенно-агроэкологический потенциал агроландшафтов физико-географических районов Беларуси, пункты ИПАП.

- Белорусская Поозерская провинция:** 1 – Нещердо-Городокская возвышенность; 2 – Суражская равнина; 3 – Витебская возвышенность; 4 – Лучосская равнина; 5 – Освейской-Браславские гряды; 6 – Дисненская низина; 7 – Полоцкая низина; 8 – Шумилинская равнина; 9 – Чашникская равнина; 10 – Ушачско-Лепельская возвышенность; 11 – Свенцянские гряды; 12 – Нарочанская равнина.
- Западно-Белорусская провинция:** 13 – Вилейская низина; 14 – Ошмянская возвышенность; 15 – Минская возвышенность; 16 – Докшицкая равнина; 17 – Верхнеберезинская равнина; 18 – Борисовская возвышенная равнина; 19 – Средненеманская низина; 20 – Верхненеманская низина; 21 – Лидская равнина; 22 – Столбцовская равнина; 23 – Гродненская возвышенность; 24 – Волковысская возвышенность; 25 – Слонимская возвышенность; 26 – Новогрудская возвышенность; 27 – Копыльская гряда.
- Предполесская провинция:** 28 – Пружанская равнина; 29 – Барановичская равнина; 30 – Слуцкая равнина; 31 – Пуховичская равнина; 32 – Центральноберезинская равнина; 33 – Бобруйская равнина; 34 – Кличевско-Рогачевская равнина; 35 – Чечерская равнина.
- Полесская провинция:** 36 – Высоковская равнина; 37 – Малоритская равнина; 38 – Равнина Загородье; 39 – Ясельдинско-Слуцкая низина; 40 – Среднеприпятская низина; 41 – Лельчицкая равнина; 42 – Мозырско-Юровичская возвышенность; 43 – Копаткевичская равнина; 44 – Василевичская низина; 45 – Речицко-Сожская низина; 46 – Комаринская низина.
- Восточно-Белорусская провинция:** 47 – Оршанская возвышенность; 48 – Горецко-Мстиславская возвышенность; 49 – Оршано-Могилёвская равнина; 50 – Костюковичская равнина

Fig. 4. Long-term average soil-agroecological potential of agrolandscapes in the physical-geographical regions of Belarus, ISAP.

- Belarusian Poozerskaya Province:** 1 – Neshcherdo-Gorodokskaya Upland; 2 – Surazhskaya Plain; 3 – Vitebskaya Upland; 4 – Luchoskaya Plain; 5 – Osveyskaya-Braslavskaya Ridges; 6 – Disnenskaya Lowland; 7 – Polotskaya Lowland; 8 – Shumilinskaya Plain; 9 – Chashnikskaya Plain; 10 – Ushachsko-Lepelskaya Upland; 11 – Svetsyanskiye Ridges; 12 – Narochanskaya Plain.
- Western Belarusian Province:** 13 – Vileyskaya Lowland; 14 – Oshmyanskaya Upland; 15 – Minskaya Upland; 16 – Dokshytskaya Plain; 17 – Verkhneberezhinskaya Plain (Upper Berezina Plain); 18 – Borisovskaya Elevated Plain; 19 – Srednenemanskaya Lowland (Middle Neman Lowland); 20 – Verkhnenemanskaya Lowland (Upper Neman Lowland); 21 – Lidskaya Plain; 22 – Stolbtsovskaya Plain; 23 – Grodnenskaya Upland; 24 – Volkovyskaya Upland; 25 – Slonimskaya Upland; 26 – Novogrudskaya Upland; 27 – Kopylskaya Ridge.
- Pre-Polesye (Predpoleskaya) Province:** 28 – Pruzhanskaya Plain; 29 – Baranovichskaya Plain; 30 – Slutskaya Plain; 31 – Pukhovichi Plain; 32 – Tsentralnoberezhinskaya Plain (Central Berezina Plain); 33 – Bobruiskaya Plain; 34 – Klichevsko-Rogachevskaya Plain; 35 – Checherskaya Plain.
- Polesye Province:** 36 – Vysokovskaya Plain; 37 – Maloritskaya Plain; 38 – Zagorodye Plain; 39 – Yaseldinsko-Slutskaya Lowland; 40 – Srednepripyatskaya Lowland (Middle Pripyat Lowland); 41 – Lelchitskaya Plain; 42 – Mozyrsko-Yurovichskaya Upland; 43 – Kopatkevichskaya Plain; 44 – Vasilevichskaya Lowland; 45 – Rechitsko-Sozhskaya Lowland; 46 – Komarinskaya Lowland.
- Eastern Belarusian Province:** 47 – Orshanskaya Upland; 48 – Goretsko-Mstislavskaya Upland; 49 – Orshano-Mogilevskaya Plain; 50 – Kostyukovichskaya Plain

ИПАП характеризуется выраженной географической дифференциацией. Наиболее высокий потенциал отмечается на западе страны, в районах Западно-Белорусской и Полесской физико-географических провинций, что обусловлено сочетанием благоприятных почвенных и климатических факторов, создающих условия для интенсивного сельскохозяйственного производства. В центральной части Беларуси потенциал умеренный, наблюдаются отдельные очаги с высоким потенциалом на Слуцкой равнине, Копыльской гряде. На востоке и севере страны, в особенности Поозерье, востоке Полесской провинции преобладают агроландшафты с низким потенциалом, что обусловлено менее благоприятными условиями для сельского хозяйства.

Наибольшим среднемноголетним значением ИПАП характеризуется Гродненская возвышенность – 112,6 пункта индекса. Высокий потенциал – 90,0 пункта индекса и более – наблюдается у агроландшафтов Волковысской, Слонимской, Новогрудской возвышенностей, Средненеманской низины. Наименьшим среднемноголетним потенциалом агроландшафтов характеризуется Нещердо-Городокская возвышенность – 55,0 пункта индекса.

Разброс значений ИПАП по физико-географическим районам Беларуси в среднем составляет 12 пунктов. Наиболее однородные показатели с размахом значений менее 3,0 характерны для Речицко-Сожской и Василевичской низин, Ушачско-Лепельской возвышенности. Наибольший размах индекса характерен для Пружанской и Барановичской равнин, Ясельдинско-Случеской низины – более 20 пунктов индекса.

Закключение. Агроэкологическая оценка является основой определения продуктивного потенциала агроландшафтов и оптимизации землепользования. Оценка продуктивности ландшафтов Беларуси показывает, что агроэкологические условия страны позволяют возделывать широкий набор культур, есть резервы для повышения их урожайности [30].

Полученные нами уравнения регрессии не противоречат известным моделям [4], поскольку предусматривают природно-антропогенные факторы, определяющие производительную способность культур, без учета мелиоративного состояния земель, внесения удобрений и применяемых агротехнологий. По некоторым оценкам, до 80 % прироста урожайности в Беларуси обеспечивается применением органических и минеральных удобрений в сочетании с известкованием [39]. Также более ранними исследованиями установлено, что для территории Беларуси климатические факторы демонстрируют слабую и умеренную корреляционную связь с урожайностью основных культур [40, 41], однако последние работы указывают на существенное климатообусловленное снижение урожайности [37] и возможность его прогнозирования с учетом погодных факторов [41]. По расчетам Г. И. Сачка, урожайность основных сельскохозяйственных культур определяют почвы – на 34 %, климатическая составляющая – на 28 % и удобрения – на 37 % [39]. Д. А. Иванову с соавторами удалось установить влияние почв и рельефа на урожайность на уровне по 27 % на каждый фактор [2], что соответствует полученным нами результатам.

Разработанная методика более полно учитывает гетерогенность почвенного покрова, что дает основание говорить о почвенно-агроэкологической оценке агроландшафтов. Методика позволяет получать статистически обоснованные результаты и может быть адаптирована под другие культуры. Рассчитанные значения ИПАП имеют сильную положительную корреляцию (0,7) с баллом почвенного плодородия и баллом кадастровой оценки сельскохозяйственных земель агроландшафтов.

Выявлены пространственно-временные особенности дифференциации ИПАП Беларуси. Наиболее высокий потенциал отмечается на Гродненской возвышенности, низкий – на Нещердо-Городокской возвышенности.

Список использованных источников

1. Витченко, А. Н. Теоретические и прикладные аспекты исследования агроэкологического потенциала ландшафтов Беларуси / А. Н. Витченко, М. Н. Брилевский // Выбранные научные работы Белорусского государственного университета, 1921–2001 : в 7 т. / Бел. гос. ун-т. – Мн., 2001. – Т. 7 : Биология. География. – С. 357–379.
2. Иванов, Д. А. Исследование влияния почвенного покрова и рельефа на продуктивность культур / Д. А. Иванов, О. В. Карасева, М. В. Рублюк // Достижения науки и техники АПК. – 2021. – Т. 35, № 2. – С. 19–26.
3. Раменский, Л. Г. Проблемы и методы изучения растительного покрова : избр. работы / Л. Г. Раменский ; ред.: В. И. Василевич [и др.]. – Л. : Наука, Ленингр. отд-ние, 1971. – 334 с.
4. Яцухно, В. М. Агроресурсный потенциал административных районов Беларуси: оценка состояния и современное использование / В. М. Яцухно // Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География. – 2016. – № 3. – С. 144–148.
5. Методика агроэкологической оценки почвенно-ресурсного потенциала эрозийных и заболоченных агроландшафтов северной, центральной и южной провинций Беларуси / Н. Н. Цыбулько, А. М. Устинова, В. Б. Цырибко [и др.]. – Мн. : Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2020. – 20 с.

6. Лысанова, Г. И. Ландшафтный анализ агроприродного потенциала геосистем / Г. И. Лысанова ; отв. ред. Ю. М. Семенов. – Иркутск : Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2001. – 188 с.
7. Кирюшин, В. И. Методология комплексной оценки сельскохозяйственных земель / В. И. Кирюшин // Почвоведение. – 2020. – № 7. – С. 871–879.
8. Белоусов, А. О. Метод расчета интегральных показателей качества и рационального использования земель сельскохозяйственного назначения в QGIS / А. О. Белоусов, В. Л. Богданов // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 160–172.
9. Дыдышко, С. В. Агроэкологическая оценка пригодности почв пахотных земель Мстиславского района для возделывания зерновых культур / С. В. Дыдышко, Т. Н. Азарёнок, О. В. Матыченкова // Почвоведение и агрохимия. – 2022. – № 1 (68). – С. 7–20.
10. Нежевляк, О. В. Агроэкологическая оценка почвенного покрова Саргатского района Омской области / О. В. Нежевляк, Е. В. Свиницкая // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2015. – № 1 (17). – С. 28–32.
11. Будрицкая, И. А. Агроэкологическая оценка почв сухостепной Кулунды / И. А. Будрицкая, В. Л. Татаринцев, Л. М. Татаринцев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 11 (133). – С. 42–50.
12. Агроэкологическая оценка комплексных соединений почв / В. И. Савич, С. Л. Белопухов, В. А. Седых, Д. Н. Никиточкин // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 6. – С. 5–11.
13. Дитц, Л. Ю. Агроэкологическая группировка почв как один из путей рационального использования земель / Л. Ю. Дитц, Н. Л. Билецкая // Гео-Сибирь. – 2007. – Т. 2, № 1. – С. 149–151.
14. Анализ методик бонитировки почв и оценки продуктивности земель / И. Б. Усков, О. В. Кононенко, П. А. Суханов, А. О. Усков // Агрохимический вестник. – 2023. – № 5. – С. 81–89.
15. Кирюшин, В. И. Агроэкологический мониторинг земель, новые требования и методология / В. И. Кирюшин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2007. – № 3 (15). – С. 9–11.
16. Лихацевич, Н. А. Типология дефляционноопасных земель Полесья и их использование / Н. А. Лихацевич, Ю. П. Качков, А. Ф. Черныш // Почвоведение и агрохимия. – 2011. – № 2 (47). – С. 52–61.
17. Гопп, Н. В. Агроэкологический потенциал западной части Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции: методика цифрового картографирования, геопространственный анализ, корреляция с содержанием органического углерода в почвах / Н. В. Гопп // Почвы и окружающая среда. – 2023. – Т. 6, № 3. – URL: <https://soils-journal.ru/index.php/POS/article/view/224> (дата обращения: 26.12.2025).
18. Санжаров, А. И. К вопросу использования ГИС-технологий для агроэкологической оценки земель в адаптивно-ландшафтных системах земледелия / А. И. Санжаров, Г. П. Глазунов, Ю. А. Соловьёва // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 7. – С. 24–32.
19. Ключникова, Е. В. Методические подходы к расчету интегрального показателя, методы ранжирования / Е. В. Ключникова, Е. М. Шитова // Инноцентр. – 2016. – № 1 (10). – С. 4–18.
20. Использование почвенно-агроклиматического индекса при оценке агрономического потенциала пахотных земель в лесостепной зоне России / Д. С. Булгаков, Д. И. Рухович, Е. А. Шишконокова, Е. В. Вильчевская // Почвоведение. – 2018. – № 4. – С. 473–485.
21. Рейнгард, Я. Р. Методика агроэкологической оценки почвенного покрова Омской области / Я. Р. Рейнгард, О. В. Нежевляк // Омский научный вестник. – 2006. – № 7 (43). – С. 150–152.
22. Кирюшин, В. И. Агротехнологии / В. И. Кирюшин, С. В. Кирюшин. – СПб. : Лань, 2022. – 464 с.
23. Панасюк, О. Ю. Методические подходы к оценке агроэкологического состояния почвенного покрова Беларуси и некоторые предварительные результаты исследований / О. Ю. Панасюк, Н. А. Дятлова // Структура и морфогенез почвенного покрова в условиях антропогенного воздействия : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 17–20 сент. 2013 г. / Бел. гос. ун-т [и др.] ; редкол.: И. И. Пирожник (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2013. – С. 41–43.
24. Белорусское Поозерье: анализ эколого-мелиоративного состояния / В. С. Аношко, М. Н. Брилевский, Ю. П. Качков [и др.]. – Мн. : Университетское, 1992. – 156 с.
25. Оценка потенциала почвенно-земельных ресурсов сельскохозяйственных организаций Беларуси с применением ГИС и использование ее результатов при оптимизации землепользования / А. Ф. Черныш, Т. А. Романова, А. Н. Червань, С. А. Касьянчик // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2011. – № 3. – С. 10–20.
26. Методика анализа структуры почвенного покрова для проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия в типовых районах и сельхозорганизациях / Д. В. Матыченков, Т. Н. Азаренок, О. В. Матыченкова [и др.]. – Мн. : Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2024. – 47 с.
27. Червань, А. Н. Типизация структуры почвенного покрова средствами ГИС для оценки производительного потенциала агроландшафтов (на примере Республики Беларусь) / А. Н. Червань // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 280–289.
28. Новиков, Д. В. Агроэкологическая типизация земель как информационная основа современного землеустройства / Д. В. Новиков // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2010. – № 1 (61). – С. 29–35.
29. Бойко, О. С. Базовые параметры агроэкологического мониторинга агроландшафтов ЦЧР / О. С. Бойко, И. И. Васенев // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2007. – № 10 (74). – С. 103–109.
30. Витченко, А. Н. Агроэкологические ресурсы ландшафтов Белоруссии / А. Н. Витченко // Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География. – 1987. – № 3. – С. 59–63.
31. Лебедева, И. И. Субстантивно-генетическая основа оценки педоразнообразия / И. И. Лебедева, Т. В. Королук // Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны : тез. докл. VII съезда О-ва почвоведов им. В. В. Докучаева и Всерос. с междунар. участием науч. конф., Белгород, 15–22 авг. 2016 г. :

- в 2 ч. / О-во почвоведов им. В. В. Докучаева, Белгор. гос. нац. исслед. ун-т ; отв. ред.: С. А. Шоба, И. Ю. Савин. – М. ; Белгород, 2016. – Ч. 2. – С. 187–188.
32. Юртаев, А. А. Агроландшафтные исследования: теория и практика / А. А. Юртаев // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия «Естественные науки». – 2011. – № 15 (110). – С. 217–221.
 33. Сазонов, А. А. Почвенно-агроэкологическая типология агроландшафтов Беларуси / А. А. Сазонов // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2025. – № 2. – С. 3–15.
 34. Сазонов, А. А. Типология агроландшафтов Республики Беларусь по агроклиматическому потенциалу на основе кластерного анализа / А. А. Сазонов, А. Л. Киндеев // Земля Беларуси. – 2025. – № 3 (91). – С. 51–61.
 35. Оценка почвенно-ресурсного потенциала пахотных земель сельскохозяйственных организаций Беларуси / Л. И. Шибут, Т. Н. Азаренок, О. В. Матыченкова [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2019. – № 2 (63). – С. 15–23.
 36. Клебанович, Н. В. Сопряженность изменений урожайности зерновых и зернобобовых культур и уровня применения удобрений по районам Республики Беларусь / Н. В. Клебанович, А. Л. Киндеев // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2022. – № 1. – С. 15–27.
 37. Коляда, В. В. Влияние изменения климата на динамику урожайности зерновых культур в регионах Беларуси / В. В. Коляда // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 17–26.
 38. Нацыянальны атлас Беларусі / Белкартаграфія ; гал. рэдкал.: У. Р. Гусакоў [і інш.] ; навук. рэд. раздз.: А. А. Каваленя [і інш.]. – Мн. : Белкартаграфія, 2024. – 1 атл. (348 с.).
 39. Сачок, Г. И. Факторы и модели изменчивости урожайности сельскохозяйственных культур Беларуси / Г. И. Сачок, Г. А. Камышенко. – Мн. : Бел. навука, 2006. – 242 с.
 40. Дмитриенкова, Ю. А. Вариация гидротермического коэффициента на территории Беларуси и его влияние на урожайность культур / Ю. А. Дмитриенкова // Природопользование : сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Ин-т проблем использования природ. ресурсов и экологии. – Мн., 2006. – № 12. – С. 40–44.
 41. Клочкиков, А. В. Влияние погодных условий на урожайность сельскохозяйственных культур / А. В. Клочкиков, О. Б. Соломко, О. С. Клочкикова // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 2. – С. 101–105.

References

1. Vitchenko A. N., Brilevskii M. N. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty issledovaniya agroekologicheskogo potentsiala landshaftov Belarusi* [Theoretical and applied aspects of the study of agroecological potential of landscapes in Belarus]. *Vybrannye nauchnye trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta*, 1921–2001: v 7 t. = Selected Scientific Works of Belarusian State University, 1921–2001: in 7 vol., 2001, vol. 7: *Biologiya. Geografiya* = Biology. Geography, pp. 357–379. (in Russian)
2. Ivanov D. A., Karaseva O. V., Rublyuk M. V. *Issledovanie vliyaniya pochvennogo pokrova i rel'efa na produktivnost' kul'tur* [Study of the influence of soil cover and relief on crop productivity]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*, 2021, vol. 35, no. 2, pp. 19–26. (in Russian)
3. Ramenskii L. G. *Problemy i metody izucheniya rastitel'nogo pokrova* [Problems and methods of studying vegetation cover]. Leningrad, Nauka, Leningr. otd-nie Publ., 1971, 334 p. (in Russian)
4. Yatsukhno V. M. *Agroresursnyi potentsial administrativnykh raionov Belarusi: otsenka sostoyaniya i sovremennoe ispol'zovanie* [Agroresource potential of administrative districts of Belarus: state assessment and modern use]. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya* = *Bulletin of BSU. Series 2, Chemistry. Biology. Geography*, 2016, no. 3, pp. 144–148. (in Russian)
5. Tsybul'ko N. N., Ustinova A. M., Tsyribko V. B., et al. *Metodika agroekologicheskoi otsenki pochvenno-resursnogo potentsiala erozionnykh i zabolochennykh agrolandshaftov severnoi, tsentral'noi i yuzhnoi provintsii Belarusi* [Methodology for agroecological assessment of soil-resource potential of eroded and waterlogged agricultural landscapes in the northern, central and southern provinces of Belarus]. Minsk, Institut sistemnykh issledovaniy v APK NAN Belarusi Publ., 2020, 20 p. (in Russian)
6. Lysanova G. I. *Landshaftnyi analiz agro prirodnogo potentsiala geosistem* [Landscape analysis of agronatural potential of geosystems]. Irkutsk, Izd-vo Instituta geografii SO RAN Publ., 2001, 188 p. (in Russian)
7. Kiryushin V. I. *Metodologiya kompleksnoi otsenki sel'skokhozyaistvennykh zemel'* [Methodology for comprehensive assessment of agricultural lands]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 2020, no. 7, pp. 871–879. (in Russian)
8. Belousov A. O., Bogdanov V. L. *Metod rascheta integral'nykh pokazatelei kachestva i ratsional'nogo ispol'zovaniya zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya v QGIS* [Method for calculating integral indicators of quality and rational use of agricultural lands in QGIS]. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii)* = *Vestnik SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 160–172. (in Russian)
9. Dydyshko S. V., Azarenok, T. N., Matychenkova O. V. *Agroekologicheskaya otsenka prigodnosti pochv pakhotnykh zemel' Mstislavskogo raiona dlya vozdel'yvaniya zernovykh kul'tur* [Agroecological assessment of the suitability of arable soils in the Mstislavl district for grain crops cultivation]. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2022, no. 1 (68), pp. 7–20. (in Russian)
10. Nezhevlyak O. V., Svintsitskaya E. V. *Agroekologicheskaya otsenka pochvennogo pokrova Sargatskogo raiona Omskoi oblasti* [Agroecological assessment of the soil cover of the Sargatsky district of the Omsk region]. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Omsk State Agrarian University*, 2015, no. 1 (17), pp. 28–32. (in Russian)

11. Budritskaya I. A., Tatarintsev V. L., Tatarintsev L. M. *Agroekologicheskaya otsenka pochv sukhostepnoi Kulundy* [Agroecological assessment of soils in the dry steppe of Kulunda]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agrarian University*, 2015, no. 11 (133), pp. 42–50. (in Russian)
12. Savich V. I., Belopukhov S. L., Sedykh V. A., Nikitochkin D. N. *Agroekologicheskaya otsenka kompleksnykh soedinenii pochv* [Agroecological assessment of complex soil compounds]. *Izvestiya Timiryazevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 2013, no. 6, pp. 5–11. (in Russian)
13. Ditts L. Yu., Biletskaya N. L. *Agroekologicheskaya gruppировка pochv kak odin iz putei ratsional'nogo ispol'zovaniya zemel'* [Agroecological grouping of soils as one of the ways to rational land use]. *Geo-Sibir' = Geo-Siberia*, 2007, vol. 2, no. 1, pp. 149–151. (in Russian)
14. Uskov I. B., Kononenko O. V., Sukhanov P. A., Uskov A. O. *Analiz metodik bonitirovki pochv i otsenki produktivnosti zemel'* [Analysis of methods for soil grading and land productivity assessment]. *Agrokhimicheskii vestnik = Agrochemistry Bulletin*, 2023, no. 5, pp. 81–89. (in Russian)
15. Kiryushin V. I. *Agroekologicheskii monitoring zemel', novye trebovaniya i metodologiya* [Agroecological monitoring of lands: new requirements and methodology]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestia of Orenburg State Agrarian University*, 2007, no. 3 (15), pp. 9–11. (in Russian)
16. Likhachevich N. A., Kachkov Yu. P., Chernysh A. F. *Tipologiya deflyatsionnoopasnykh zemel' Poles'ya i ikh ispol'zovanie* [Typology of deflation-prone lands in Polesie and their use]. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2011, no. 2 (47), pp. 52–61. (in Russian)
17. Gopp N. V. *Agroekologicheskii potentsial zapadnoi chasti Kuznetsko-Salairskoi geomorfologicheskoi provintsii: metodika tsifrovogo kartografirovaniya, geoprostranstvennyi analiz, korrelyatsiya s sodержaniem organicheskogo ugleroda v pochvakh* [Agroecological potential of the western part of the Kuznetsk-Salair geomorphological province: methods of digital mapping, geospatial analysis, correlation with soil organic carbon content]. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda = Soils and Environment*, 2023, vol. 6, no. 3. URL: <https://soils-journal.ru/index.php/POS/article/view/224> (accessed 26.12.2025). (in Russian)
18. Sanzharov A. I., Glazunov G. P., Solov'eva Yu. A. *K voprosu ispol'zovaniya GIS-tekhnologii dlya agroekologicheskoi otsenki zemel' v adaptivno-landshaftnykh sistemakh zemledeliya* [On the use of GIS technologies for agroecological assessment of lands in adaptive-landscape farming systems]. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of Kursk State Agricultural Academy*, 2019, no. 7, pp. 24–32. (in Russian)
19. Klyushnikova E. V., Shitova E. M. *Metodicheskie podkhody k raschetu integral'nogo pokazatelya, metody ranzhirovaniya* [Methodological approaches to calculating the integral indicator, ranking methods]. *Innoventr = InnoCentre*, 2016, no. 1 (10), pp. 4–18. (in Russian)
20. Bulgakov D. S., Rukhovich D. I., Shishkonakova E. A., Vil'chevskaya E. V. *Ispol'zovanie pochvenno-agroklimaticheskogo indeksa pri otsenke agronomicheskogo potentsiala pakhotnykh zemel' v lesostepnoi zone Rossii* [Use of the soil-agroclimatic index in assessing the agronomic potential of arable lands in the forest-steppe zone of Russia]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 2018, no. 4, pp. 473–485. (in Russian)
21. Reingard Ya. R., Nezhevlyak O. V. *Metodika agroekologicheskoi otsenki pochvennogo pokrova Omskoi oblasti* [Methodology for agroecological assessment of the soil cover of the Omsk region]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2006, no. 7 (43), pp. 150–152. (in Russian)
22. Kiryushin V. I., Kiryushin S. V. *Agrotekhnologii* [Agricultural technologies]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2022, 464 p. (in Russian)
23. Panasyuk O. Yu., Dyatlova N. A. *Metodicheskie podkhody k otsenke agroekologicheskogo sostoyaniya pochvennogo pokrova Belarusi i nekotorye predvaritel'nye rezul'taty issledovaniy* [Methodological approaches to assessing the agroecological state of the soil cover of Belarus and some preliminary research results]. *Struktura i morfogeneza pochvennogo pokrova v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya = Structure and morphogenesis of soil cover under anthropogenic impact*. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf., Minsk, September 17–20, 2013. Minsk, Belarusian State University, 2013, pp. 41–43. (in Russian)
24. Anoshko V. S., Brilevskii M. N., Kachkov Yu. P., et al. *Belorusskoe Poozer'e: analiz ekologo-meliorativnogo sostoyaniya* [Belarusian Lakeland: analysis of ecological and reclamation state]. Minsk, Universitetskoe Publ., 1992, 156 p. (in Russian)
25. Chernysh A. F., Romanova T. A., Chervan' A. N., Kas'yachik S. A. *Otsenka potentsiala pochvenno-zemel'nykh resursov sel'skokhozyaistvennykh organizatsii Belarusi s primeneniem GIS i ispol'zovanie ee rezul'tatov pri optimizatsii zemlepol'zovaniya* [Assessment of the potential of soil and land resources of agricultural organizations in Belarus using GIS and the use of its results in optimizing land use]. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*, 2011, no. 3, pp. 10–20. (in Russian)
26. Matychenkov D. V., Azarenok T. N., Matychenkova O. V., et al. *Metodika analiza struktury pochvennogo pokrova dlya proektirovaniya adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya v tipovykh raionakh i sel'khozorganizatsiyakh* [Methodology for analyzing the soil cover structure for designing adaptive-landscape farming systems in typical districts and agricultural organizations]. Minsk, Institut sistemnykh issledovaniy v APK NAN Belarusi Publ., 2024, 47 p. (in Russian)
27. Chervan' A. N. *Tipizatsiya struktury pochvennogo pokrova sredstvami GIS dlya otsenki proizvoditel'nogo potentsiala agrolandshaftov (na primere Respubliki Belarus')* [Typification of the soil cover structure using GIS for assessing

- the productive potential of agricultural landscapes (on the example of the Republic of Belarus)]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya "Biologiya. Nauki o Zemle"* = Bulletin of Udmurt University. Series "Biology. Earth Sciences", 2021, vol. 31, no. 3, pp. 280–289. (in Russian)
28. Novikov D. V. *Agroekologicheskaya tipizatsiya zemel' kak informatsionnaya osnova sovremennogo zemleustroistva* [Agroecological typification of lands as an information basis for modern land management]. *Zemleustroistvo, kadastr i monitoring zemel'* = *Land Management, Cadastre and Land Monitoring*, 2010, no. 1 (61), pp. 29–35. (in Russian)
 29. Boiko O. S., Vasenev I. I. *Bazovye parametry agroekologicheskogo monitoringa agrolandshaftov TsChR* [Basic parameters of agroecological monitoring of agricultural landscapes in the Central Chernozem Region]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* = *Vestnik of Orenburg State University*, 2007, no. 10 (74), pp. 103–109. (in Russian)
 30. Vitchenko A. N. *Agroekologicheskie resursy landshaftov Belorussii* [Agroecological resources of landscapes of Belarus]. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya* = *Bulletin of BSU. Series 2, Chemistry. Biology, Geography*, 1987, no. 3, pp. 59–63. (in Russian)
 31. Lebedeva I. I., Korolyuk T. V. *Substantivno-geneticheskaya osnova otsenki pedoraznoobraziya* [Substantive-genetic basis for assessing pedodiversity]. *Pochvovedenie – prodovol'stvennoi i ekologicheskoi bezopasnosti strany* = Soil Science for Food and Environmental Security of the Country. Proc. VII Congr. of V. V. Dokuchaev Society of Soil Scientists and All-Russ. Sci. Conf. with Int. Particip., Belgorod, August 15–22, 2016. Moscow, Belgorod, 2016, part 2, pp. 187–188. (in Russian)
 32. Yurtaev A. A. *Agrolandshaftnye issledovaniya: teoriya i praktika* [Agrolandscape research: theory and practice]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Estestvennye nauki"* = *Belgorod State University Scientific Bulletin. Series "Natural Sciences"*, 2011, no. 15 (110), pp. 217–221. (in Russian)
 33. Sazonov A. A. *Pochvenno-agroekologicheskaya tipologiya agrolandshaftov Belarusi* [Soil-agroecological typology of agricultural landscapes of Belarus]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya* = *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*, 2025, no. 2, pp. 3–15. (in Russian)
 34. Sazonov A. A., Kindeev A. L. *Tipologiya agrolandshaftov Respubliki Belarus' po agroklimaticheskomu potentsialu na osnove klasternogo analiza* [Typology of agricultural landscapes of the Republic of Belarus by agroclimatic potential based on cluster analysis]. *Zemlya Belarusi* = *Land of Belarus*, 2025, no. 3 (91), pp. 51–61. (in Russian)
 35. Shibut L. I., Azarenok T. N., Matychenkova O. V., et al. *Otsenka pochvenno-resursnogo potentsiala pakhotnykh zemel' sel'skokhozyaistvennykh organizatsii Belarusi* [Assessment of the soil-resource potential of arable lands of agricultural organizations in Belarus]. *Pochvovedenie i agrokhimiya* = *Soil Science and Agrochemistry*, 2019, no. 2 (63), pp. 15–23. (in Russian)
 36. Klebanovich N. V., Kindeev A. L. *Sopryazhennost' izmenenii urozhainosti zernovykh i zernobobovykh kul'tur i urovnya primeneniya udobrenii po raionam Respubliki Belarus'* [Conjugation of changes in the yield of grain and leguminous crops and the level of fertilizer application in the districts of the Republic of Belarus]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya* = *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*, 2022, no. 1, pp. 15–27. (in Russian)
 37. Kolyada V. V. *Vliyanie izmeneniya klimata na dinamiku urozhainosti zernovykh kul'tur v regionakh Belarusi* [Impact of climate change on the yield dynamics of grain crops in the regions of Belarus]. *Prirodopol'zovanie* = *Nature Management*, 2025, iss. 1, pp. 17–26. (in Russian)
 38. *Nacyanal'ny atlas Belarusi* [National Atlas of Belarus]. *Belkartografiya* [Belkartografiya]. Chief editorial board: U. R. Gusakov [et al.]; scientific editors of sections: A. A. Kavalenya [et al.]. Minsk, Belkartografiya Publ., 2024, 348 p. (in Belarussian)
 39. Sachok G. I. *Faktory i modeli izmenchivosti urozhainosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur Belarusi* [Factors and models of yield variability of agricultural crops in Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2006, 242 p. (in Russian)
 40. Dmitrienkova Yu. A. *Variatsiya gidrotermicheskogo koeffitsienta na territorii Belarusi i ego vliyanie na urozhainost' kul'tur* [Variation of the hydrothermal coefficient in Belarus and its influence on crop yields]. *Prirodopol'zovanie* = *Nature Management*, 2006, no. 12, pp. 40–44. (in Russian)
 41. Klochkov A. V., Solomko O. B., Klochkova O. S. *Vliyanie pogodnykh uslovii na urozhainost' sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* [Influence of weather conditions on the yield of agricultural crops]. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii* = *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*, 2019, no. 2, pp. 101–105. (in Russian)

Информация об авторе

Сазонов Алексей Александрович – старший преподаватель, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: alexey.szonov@gmail.com

Information about the author

Alexey A. Sazonov – Senior lecturer, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: alexey.szonov@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-71-86>
УДК 631.459(476)+631.4

Поступила в редакцию 26.02.2026
Received 26.02.2026

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ПОЧВ К ВОДНОЙ ЭРОЗИИ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЛЯХ НОВОГРУДСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Д. А. Кислицын¹, А. М. Небышинец¹, Н. В. Клебанович²

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;

²ОО «Белорусское географическое общество», Минск, Беларусь

Аннотация. В статье приведены результаты геоинформационной оценки уязвимости почв к водной эрозии на сельскохозяйственных землях Новогрудской возвышенности. На основе комплексного учета рельефа, почвенного покрова, климата и растительности выделены территории с различной степенью эрозионной опасности. По цифровой модели рельефа (ЦМР) FABDEM Copernicus GLO в ArcGIS 10.7 и SAGA GIS 7.8.2 рассчитаны уклон, вертикальное расчленение, LS-фактор и топографический индекс увлажнения (TWI). Почвенные условия учтены через коэффициент фильтрации и коэффициент Водогрецкого; климатические показатели – через эрозионный индекс дождевых осадков (R-фактор) и средние из максимальных запасов воды в снеге перед снеготаянием за 2015–2025 гг. Фактор растительного покрова (C) рассчитан по минимальным значениям вегетационного индекса NDVI на основе космических снимков Sentinel-2. Интеграция показателей в растровой модели позволила получить карту относительных рисков и классифицировать почвы на слабо-, средне- и сильноэродированные с применением порогов по LS-фактору, вертикальному расчленению рельефа и индексу TWI. Показано, что зоны повышенной эрозионной опасности приурочены к центральной части возвышенности и ее восточным склонам. Общая площадь почв, подверженных плоскостному смыву, составила 20 847,6 га, а максимум отмечен в Новогрудском районе (9630,0 га).

Ключевые слова: геоинформационный анализ; водная эрозия; почвенный покров; LS-фактор; климат.

Для цитирования. Кислицын Д. А., Небышинец А. М., Клебанович Н. В. Геоинформационная оценка уязвимости почв к водной эрозии на сельскохозяйственных землях Новогрудской возвышенности // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 71–86.

GEOINFORMATION ASSESSMENT OF SOIL VULNERABILITY TO WATER EROSION ON AGRICULTURAL LANDS OF THE NOVOGRUDOK UPLAND

D. A. Kislitsyn¹, A. M. Nebyshynets¹, N. V. Klebanovich²

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus;

²Belarusian Geographical Society, Minsk, Belarus

Abstract. The article presents the results of a geoinformation assessment of soil vulnerability to water erosion on agricultural lands of the Novogrudok Upland. Based on a comprehensive consideration of relief, soil cover, climate and vegetation, areas with varying degrees of erosion risk were identified. The slope, vertical dissection, LS-factor and topographic wetness index (TWI) were calculated using the FABDEM Copernicus GLO digital elevation model (DEM) in ArcGIS 10.7 and SAGA GIS 7.8.2. Soil conditions were taken into account through the filtration coefficient and Vodogretsky coefficient; climatic indicators were taken into account through the rainfall erosion index (R-factor) and average of the maximum water reserves in snow before snowmelt for 2015–2025. The vegetation cover factor (C) is calculated based on the minimum values of the NDVI vegetation index based on Sentinel-2 space images. The integration of indicators in a raster model made it possible to obtain a map of relative risks and classify soils as weakly, moderately, and strongly eroded using thresholds for LS-factor, vertical dissection of relief and index TWI. It was shown that areas of increased erosion risk are confined to the central part of the uplands and its eastern slopes. The total area of soils subject to water erosion was 20,847.6 ha, with the maximum recorded in the Novogrudok district (9,630.0 ha).

Keywords: geoinformation analysis; water erosion; soil cover; LS-factor; climate.

For citation. Kislitsyn D. A., Nebyshynets A. M., Klebanovich N. V. Geoinformation assessment of soil vulnerability to water erosion on agricultural lands of the Novogrudok upland. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 71–86.

Введение. Водная эрозия остаётся одной из ключевых причин деградации почв сельскохозяйственных земель: она снижает плодородие, усиливает вынос мелкозёма и питательных веществ, повышает заиливание водотоков и ведёт к экономическим потерям землепользования. Для районов с выраженным холмисто-увалистым рельефом риск эрозионных процессов особенно высок из-за сочетания повышенной крутизны склонов, особенностей стока и землепользования. Для Новогрудской возвышенности проблема особенно значима из-за сочетания расчленённого рельефа и интенсивного сельскохозяйственного использования, что формирует пространственно неоднородные зоны повышенного риска плоскостного смыва. В этих условиях геоинформационный подход позволяет оперативно и объективно оценить уязвимость почв на больших территориях за счёт интеграции данных о рельефе (морфометрические показатели), свойствах почв, климатических факторах и состоянии растительного покрова (в том числе по спутниковым данным), а результаты могут быть напрямую использованы для планирования экологически устойчивого землепользования и проведения природоохранных мероприятий.

В Беларуси для определения ареалов распространения водной эрозии в основном использовались почвенно-эрозионные обследования, тогда как геоинформационные технологии и данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) применялись реже. При этом проводились исследования по адаптации универсального уравнения потери почвы (RUSLE) к условиям страны [1], а также по высокодетальному моделированию LS-фактора по аэрофотосъёмке для небольших территорий [2] и картографированию плоскостной эрозии в QGIS с разделением по классам уклонов рельефа [3]. Также продемонстрированы возможности ГИС-технологий при анализе активности эрозии и денудации по разновременным топографическим картам [4] и при прикладном картографировании деградации почв сельскохозяйственных земель [5], включая автоматизированное дешифрирование космических снимков QuickBird и использование индекса оксида железа для создания почвенно-эрозионных карт [6].

Идентификация линейных форм эрозии по одному лишь автоматизированному дешифрированию космических снимков по спектральной яркости затруднена: светлые тона характерны не только для эродированных почв, но и для полей со всходами озимых. При этом плоскостной смыв меняет окраску пахотного слоя, что позволяет оценивать степень эродированности по данным ДЗЗ с учётом типа почв [7]. Для диагностики деградации почв также используют динамику вегетационных индексов и факторы окружающей среды (земельный покров, осадки, рельеф): показаны подходы на основе индекса EVI, рассчитанного по снимкам MODIS, в сочетании с информацией об осадках и землепользовании [8]; интеграции цифровой модели рельефа (ЦМР), снимков, почвенных и метеоданных для оценки водной эрозии на водосборах [9], а также совместного учёта водной и ветровой эрозии через уравнения RUSLE и RWEQ с использованием NDVI и данных о земельном покрове [10].

Морфометрический ГИС-анализ ЦМР (уклоны, экспозиция, кривизна, превышения, густота речной сети) даёт основу для расчёта производных показателей, включая индекс TWI и LS-фактор, и объяснения пространственной дифференциации эрозионной опасности [11]. ГИС-технологии применяются как для расчёта потенциальных потерь почвы на пашне, так и для выделения и картографирования зон повышенной эрозионной опасности на региональном уровне [12], а обзор моделей смыва и возможностей применения ГИС и данных ДЗЗ для идентификации и картографирования эродированных почв систематизирован в монографии [13].

В целом в литературе широко представлены модификации универсальных уравнений потери почв (USLE/RUSLE), а топографический фактор LS чаще всего описывают через длину и крутизну склонов; при этом учёт вертикального расчленения рельефа рассматривается как путь повышения точности при картографировании эродированных почв пахотных земель и участков овражно-балочной сети [14]. Актуальность оценки уязвимости усиливается климатическими трендами: для Беларуси отмечены риски для сельского хозяйства и необходимость адаптационных мер [15], зафиксирован рост климатической уязвимости (23–30 %) с ключевым вкладом интенсификации экстремальных осадков [16], предложены подходы к оценке уязвимости почв сельскохозяйственных земель к климатическим изменениям [17] и проведены локальные оценки рисков для секторов экономики, включая сельское хозяйство [18].

Цель – выполнить геоинформационную оценку уязвимости почв к водной эрозии на сельскохозяйственных землях Новогрудской возвышенности и выделить территории с различной степенью эрозионной опасности на основе комплексного учёта факторов рельефа, почв, климата и растительного покрова.

Основные задачи исследования:

- 1) проанализировать ключевые факторы, влияющие на проявление водной эрозии (рельеф, почвенный покров, климат, растительность), и сформировать набор оценочных показателей;
- 2) выполнить относительную оценку рисков проявления водной эрозии на сельскохозяйственных землях Новогрудской возвышенности;
- 3) определить структуру эродированных почв по степени проявления плоскостного смыва по сельсоветам.

Материалы и методы исследований. В качестве исследуемой территории выбраны три района на юго-востоке Гродненской области (Дятловский, Новогрудский и Кореличский), которые составляют основную часть Новогрудской возвышенности (общая площадь – 419 604 га). Репрезентативность данной территории для изучения степени проявления водной эрозии обусловлена дифференциацией почв вследствие особенностей рельефа, а также высоким уровнем сельскохозяйственной освоенности. Почвообразующие породы Новогрудской возвышенности достаточно разнообразны по генезису, гранулометрическому составу и представлены лёссовидными суглинками, моренными супесями и суглинками, водно-ледниковыми супесями и песками, отложениями речного аллювия, торфа (в понижениях рельефа) и овражно-балочного делювия [19].

Среди основных типов рельефа преобладают грядово-холмистые и холмистые ледниковые образования, а также пологохолмистые и холмистые моренные равнины. К более низким гипсометрическим уровням приурочены участки водно-ледниковых равнин и речных долин [20]. Особенности рельефа оказывают влияние на основные климатические показатели: годовое количество осадков на 50–100 мм выше, чем в близлежащих Лиде и Ивье, а зимние температуры на 1–1,5° ниже, что увеличивает запасы воды в снеге по сравнению с соседними физико-географическими районами [19]. На юго-востоке исследуемой территории, а также в окрестностях Любчи и Кореличей пахотные земли занимают обширные площади, что связано с высоким уровнем почвенного плодородия. К долинам рек Сервечь и Неман (на востоке Новогрудской возвышенности) приурочены крупные участки луговых земель, которые также сконцентрированы к западу от речной долины Уши в пределах понижения рельефа.

Основные методы исследования, которые применялись для выявления эродированных почв и пространственного анализа их распределения, – геоинформационный, картографический, сравнительный и статистический. Геоинформационный анализ особенностей рельефа выполнен путём обработки цифровой модели FABDEM Copernicus GLO [21] с пространственным разрешением 24 м, которая имеет высокий уровень точности. Уклон и вертикальное расчленение рельефа рассчитаны в среде ArcGIS 10.7, а фактор длины и крутизны склонов (LS) и топографический индекс увлажнённости (TWI) получены на основе анализа ЦМР в ГИС SAGA 7.8.2.

Для проведения относительной оценки рисков проявления водной эрозии на сельскохозяйственных землях учтена информация о таких ключевых факторах, как рельеф, почвенный покров, климат и растительность, а расчёт итогового результата выполнен путём применения инструмента «Калькулятор раstra» в ArcGIS 10.7 по формуле (1):

$$A = \frac{LS \cdot k_{\text{Водогрецкого}} \cdot (R + h) \cdot C}{k_{\text{фильтрации}} \cdot TWI}, \quad (1)$$

где A – относительная оценка рисков проявления водной эрозии; LS – фактор длины и крутизны склонов; $k_{\text{Водогрецкого}}$ – коэффициент Водогрецкого; R – эрозионный индекс дождей осадков; h – средние из максимальных запасов воды в снеге перед снеготаянием, мм; C – фактор растительного покрова; $k_{\text{фильтрации}}$ – коэффициент фильтрации, м/сут; TWI (Topographic Wetness Index) – топографический индекс увлажнённости.

Цифровая обработка и тематическая интерпретация космических снимков Sentinel-2 проводилась для расчёта фактора растительного покрова, который основан на минимальных значениях индекса NDVI за период вегетации, а также для определения пространственного расположения сельскохозяйственных земель в пределах Новогрудской возвышенности путём контролируемой классификации методом максимального правдоподобия в ArcGIS 10.7. Высокое пространственное разрешение снимков Sentinel-2 (10 м для четырёх спектральных каналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах) и дополнительное использование информации об индексе NDVI позволяют определить расположение пахотных и луговых земель [22]. В процессе автоматизированного дешифрирования космического снимка Sentinel-2 также были выделены следующие виды земель: лесные, под древесно-кустарниковой растительностью, под болотами, под водными объектами, под застройкой и общего пользования. Векторные слои границ районов и сельсоветов получены на основе открытых данных из OpenStreetMap [23].

Результаты и их обсуждение. Комплексный учёт уклона рельефа и длины склонов осуществляется на основе расчёта LS -фактора, который используется для относительной оценки эрозионного потенциала рельефа. Применение инструмента «LS-factor, field based», который представлен в ГИС SAGA, позволяет рассчитать LS -фактор на основе глобальной ЦМР FABDEM. Полученный растр фактора длины и крутизны склонов отличается достаточно высоким контрастом значений, поэтому для улучшения его визуализации и дальнейшей интерпретации выполнен экспорт растрового изображения

в ГИС ArcGIS, где проведён расчёт средневзвешенных значений по сельсоветам исследуемой территории. Следует отметить, что при расчёте относительной оценки рисков проявления водной эрозии использованы непрерывные значения LS-фактора, рассчитанные для территории Новогрудской возвышенности. Наименьшие средние значения LS-фактора (менее 0,3) характерны для Щорсовского и Еремичского сельсоветов, что обусловлено доминированием равнинных форм рельефа в пределах речной долины Немана и её окрестностей. Значения эрозионного потенциала рельефа в пределах Дятловского района увеличиваются при переходе от западной к восточной части, что обусловлено более высокой крутизной склонов в верхней части бассейна реки Молчадь.

В центральной части Новогрудской возвышенности, для которой характерны более высокие значения уклона рельефа, значения LS-фактора превышают 0,9, а для четырёх сельсоветов, расположенных к северу и востоку от Новогрудка, а также к юго-западу от Кореличей, данный показатель в среднем составляет более 1,2. Центральная часть Кореличского района имеет невысокие значения LS-фактора, что обусловлено более высоким удельным весом понижений рельефа по сравнению с верховьями речных бассейнов Невды, Ятранки и Валовки (рис. 1).

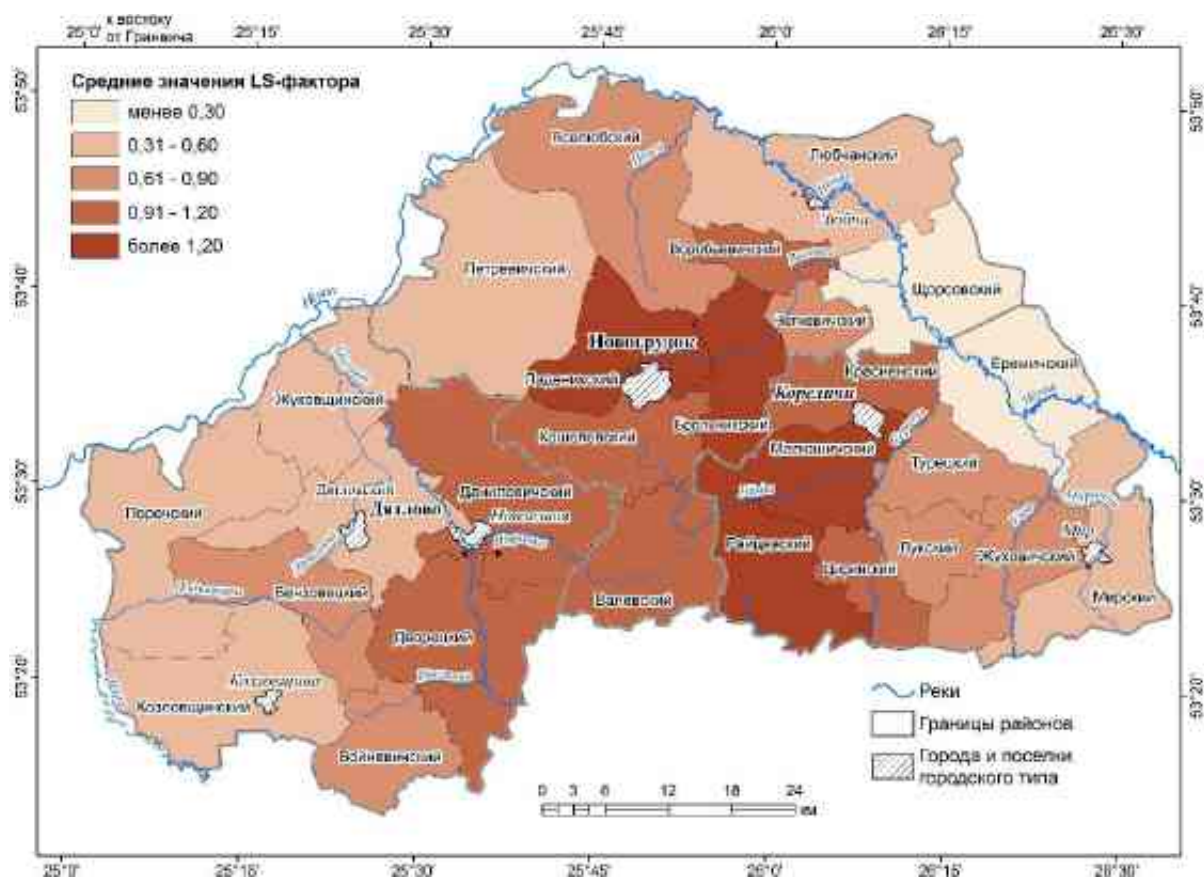


Рис. 1. Средние значения фактора длины и крутизны склонов (LS) по сельсоветам исследуемой территории

Fig. 1. Average values of the slope length and steepness factor (LS) for selsoviets in the study area

Для выполнения оценки степени подверженности почв процессам водной эрозии также применяется информация о генезисе и гранулометрическом состав почвенного покрова. Высокая степень устойчивости почв к плоскостному смыву определяется на основе более высоких значений коэффициента фильтрации почв. В пределах Новогрудской возвышенности наименьшие значения коэффициента фильтрации (0,14 м/сут) характерны для лёссовидных суглинков и глин, а наибольшие – для моренных песков (3,62 м/сут). Высокая устойчивость к процессам водной эрозии отмечена для водно-ледниковых и моренных песков, а очень низкая – для лёссовидных суглинков и глин [24]. В среде ArcGIS в векторный класс пространственных объектов, содержащий информацию о почвенном покрове сельскохозяйственных земель в крупном масштабе, внесены значения коэффициента фильтрации почв на основе атрибутивных полей, которые характеризуют генезис и гранулометрический состав (Kod 2 и Kod 3 соответственно). Коэффициент фильтрации не рассчитывался для сельскохозяйственных земель на переувлажнённых почвах, которые не подвержены водной эрозии. Информация

о почвенном покрове в масштабе 1 : 10 000 представлена в основном для территории сельскохозяйственных земель, удельный вес которых значительно различается по сельсоветам трёх административных районов, поэтому картографирование данного коэффициента выполнено без обобщения средневзвешенных значений по сельсоветам. В окрестностях Кореличей, к юго-западу и югу от Любчи, а также северо-восточнее Новогрудка значения коэффициента фильтрации почв имеют низкие значения (менее 0,25 м/сут). В западной части Дятловского района значения данного показателя превышают 0,45 м/сут, а к северо-востоку от Новоельни достигают 0,36–0,45 м/сут, что обусловлено более высоким удельным весом водно-ледниковых песков и супесей (рис. 2).

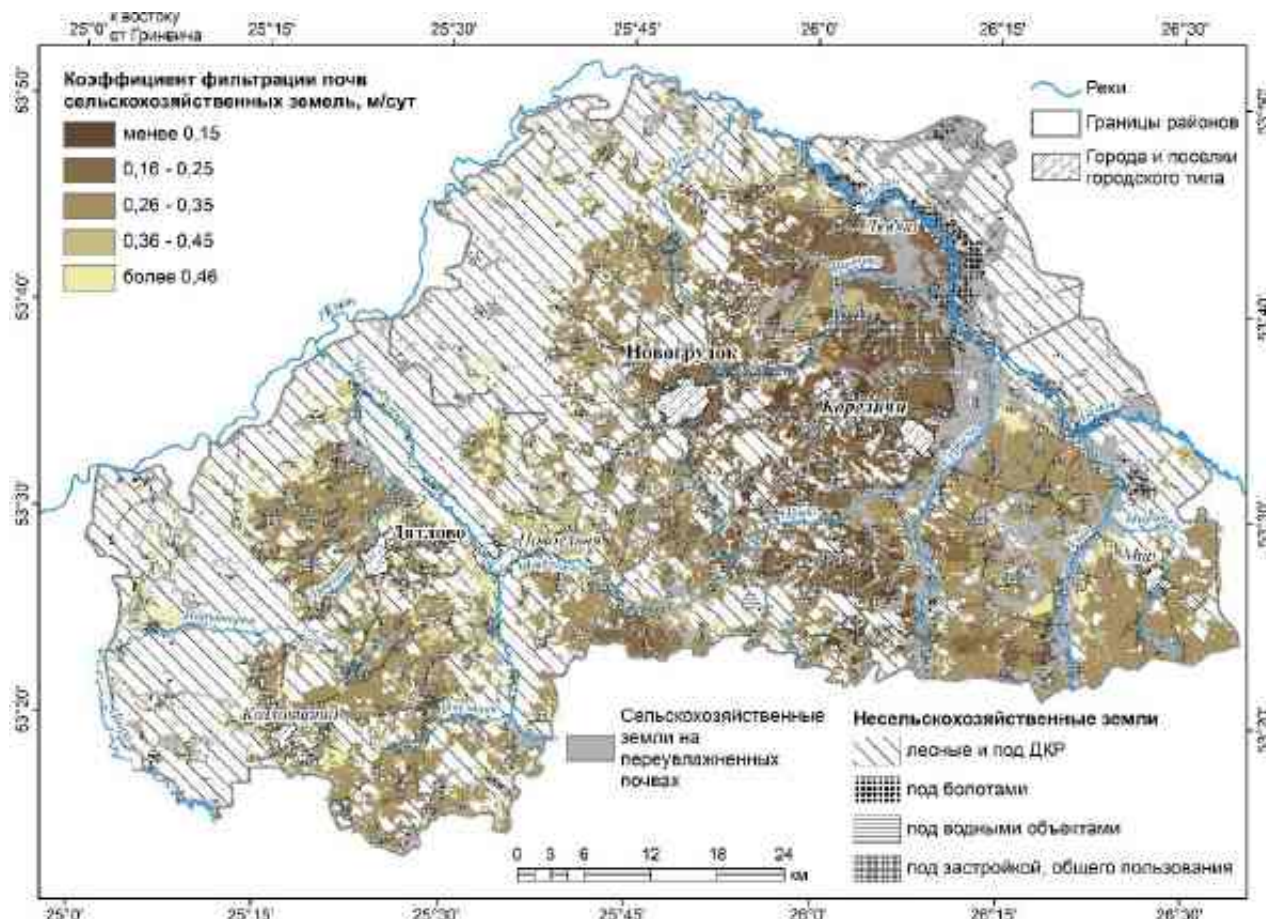


Рис. 2. Коэффициент фильтрации (м/сут) почв сельскохозяйственных земель Новогрудской возвышенности

Fig. 2. Filtration coefficient (m/day) of agricultural soils of the Novogrudok Upland

Оценка интенсивности склонового стока на зяби при одинаковых запасах воды в снеге за период снеготаяния осуществляется на основе коэффициента Водогрецкого, учитывающего данные об уклоне рельефа (в %) и гранулометрическом составе почв. При одинаковых значениях крутизны склонов более высокие значения коэффициента Водогрецкого характерны для суглинистых и глинистых почв по сравнению с супесчаными.

Для контуров почв рассчитаны средние значения уклона рельефа (в %), а также выделены две группы по гранулометрическому составу, что позволило определить коэффициент Водогрецкого с высоким уровнем детальности для сельскохозяйственных земель Новогрудской возвышенности. Следует отметить, что для песчаных и переувлажнённых почв (за исключением дерново-подзолистых глееватых почв, которые могут быть намытыми) данный коэффициент не рассчитывались, так как водная эрозия в их пределах отсутствует или проявляется на минимальном уровне. Достаточно высокие значения коэффициента Водогрецкого (более 0,30) характерны для дерново-подзолистых почв на лёссовидных суглинках (реже супесях), расположенных на склонах с высокими значениями уклона рельефа (к западу от Кореличей, северо-восточнее Новогрудка). Для территорий, где доминируют супесчаные почвы на пологих склонах (центральная часть Дятловского района, окрестности Любчи), значения коэффициента Водогрецкого составляют менее 0,10–0,15 (рис. 3).

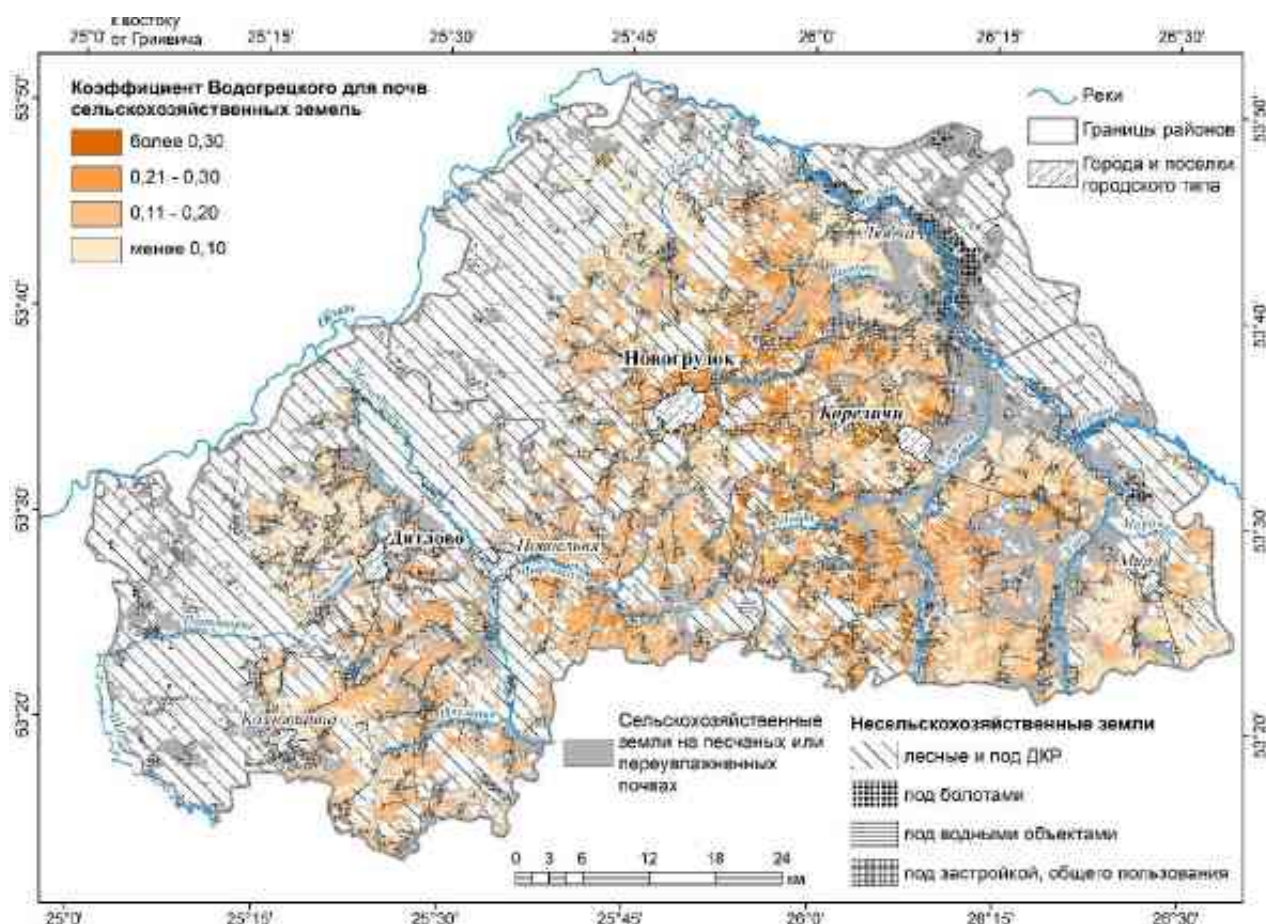


Рис. 3. Дифференциация значений коэффициента Водогретского для почв сельскохозяйственных земель Новогрудской возвышенности

Fig. 3. Differentiation of the values of the coefficient Vodogretskogo for agricultural soils of the Novogrudok Upland

Максимальные запасы воды в снеге перед снеготаянием рассматривались как климатический показатель, характеризующий потенциальный вклад снеготаяния в формирование поверхностного стока. Оценка средних из максимальных значений запасов воды в снеге перед снеготаянием была выполнена на основе данных с конца февраля – начала марта за период 2015–2025 гг. В качестве источников использовались наблюдения метеостанции Новогрудок, а также ближайших к ней метеостанций. Период 2015–2025 гг. для оценки максимальных запасов воды в снеге перед снеготаянием выбран в связи с необходимостью обеспечить достаточный объём сопоставимых данных наблюдений и минимизировать влияние пропусков в отдельных годах. Использование более длительного ряда также позволяет сгладить межгодовую изменчивость снеготаяния и получить более устойчивую характеристику снегового фактора для исследуемой территории.

Анализ пространственного распределения показывает выраженную центральную область повышенных значений и постепенное снижение значений к периферии, особенно в юго-западном и восточном направлениях. Максимальные запасы воды в снеге (более 21,0 мм) наблюдаются в центральной части территории, вблизи Новогрудка и ближайших к нему участков. Эта область характеризуется наиболее интенсивным накоплением твёрдых осадков, что, вероятно, связано с повышенной абсолютной высотой и особенностями локального рельефа. К востоку (Кореличи и Любча) значения постепенно снижаются до 19,6–21,0 мм, формируя переходную зону. Далее, в районах Мира, Новоельни и Дятлово, фиксируются средние запасы (в пределах 16,6–19,5 мм). Минимальные значения (менее 15,0 – 16,5 мм) отмечаются в юго-западной части территории, вблизи Козловщины и частично на западных окраинах Дятловского района. Эта отражает сравнительно низкое водное содержание снега, вероятно, обусловленное меньшим количеством осадков и более частыми оттепелями (рис. 4).

Оценка эрозионного индекса дождевых осадков (R-фактор) выполнена на основе глобальных моделей ежемесячного распределения данного показателя, представленных в исследовании Р. Panagos

с соавторами [25]. Для анализа R-фактора сделано сложение значений за период с мая по сентябрь, так как ливневые осадки в другие месяцы практически не наблюдаются. Полученные данные имели низкое пространственное разрешение (около 1 км), поэтому для более корректного перехода к размеру ячейки раstra, равному 24 м, выполнено создание произвольно расположенных точек, для которых извлекались значения R-фактора и на их основе проводилась интерполяция методом Сплайн в ArcGIS 10.7.

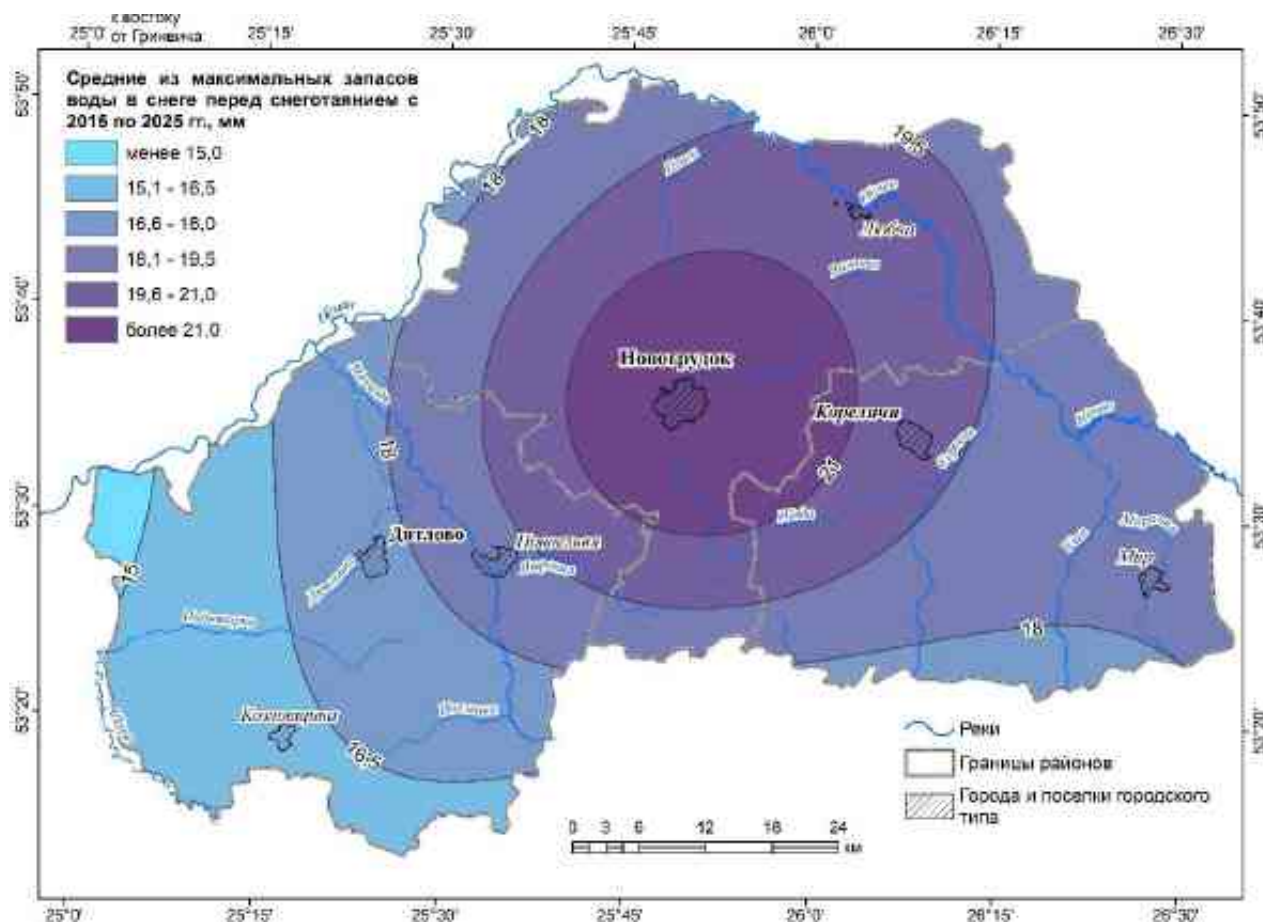


Рис. 4. Пространственная дифференциация средних из максимальных запасов воды в снеге перед снеготаянием, 2015–2025 гг., мм

Fig. 4. Spatial differentiation of average maximum water reserves in snow before snowmelt, 2015–2025, mm

Распределение R-фактора носит мозаичный характер с выраженными ареалами повышенных значений в центральной зоне и доминированием низких, умеренных значений на восточной и юго-восточной периферии, при общей неоднородности показателя на всей территории. Наиболее высокие значения (521–540 и более 540) приурочены преимущественно к центральной части территории, где компактный очаг максимума выделяется в районе Новогрудка. Зоны повышенных значений (501–520) формируют вытянутую полосу в центрально-западной части территории и представлены отдельными локальными участками в окрестностях Дятлово и Новоелини. Это может свидетельствовать о влиянии климатического фактора в формировании потенциальной опасности водной эрозии. В направлении к востоку и юго-востоку (вблизи Кореличей, Мира, в окрестностях Любчи) преобладают пониженные значения R-фактора (менее 460 и 461–480). Юго-западная часть (в окрестностях Козловщины) характеризуется преимущественно низкими – умеренными значениями (преимущественно 461–500), с отдельными более высокими значениями (рис. 5).

Расчет фактора растительного покрова (С-фактор) выполнен на основе значений вегетационного индекса NDVI, преобразованного по формуле (2) [26]:

$$C = 0,1 \cdot \left(\frac{-NDVI + 1}{2} \right). \quad (2)$$

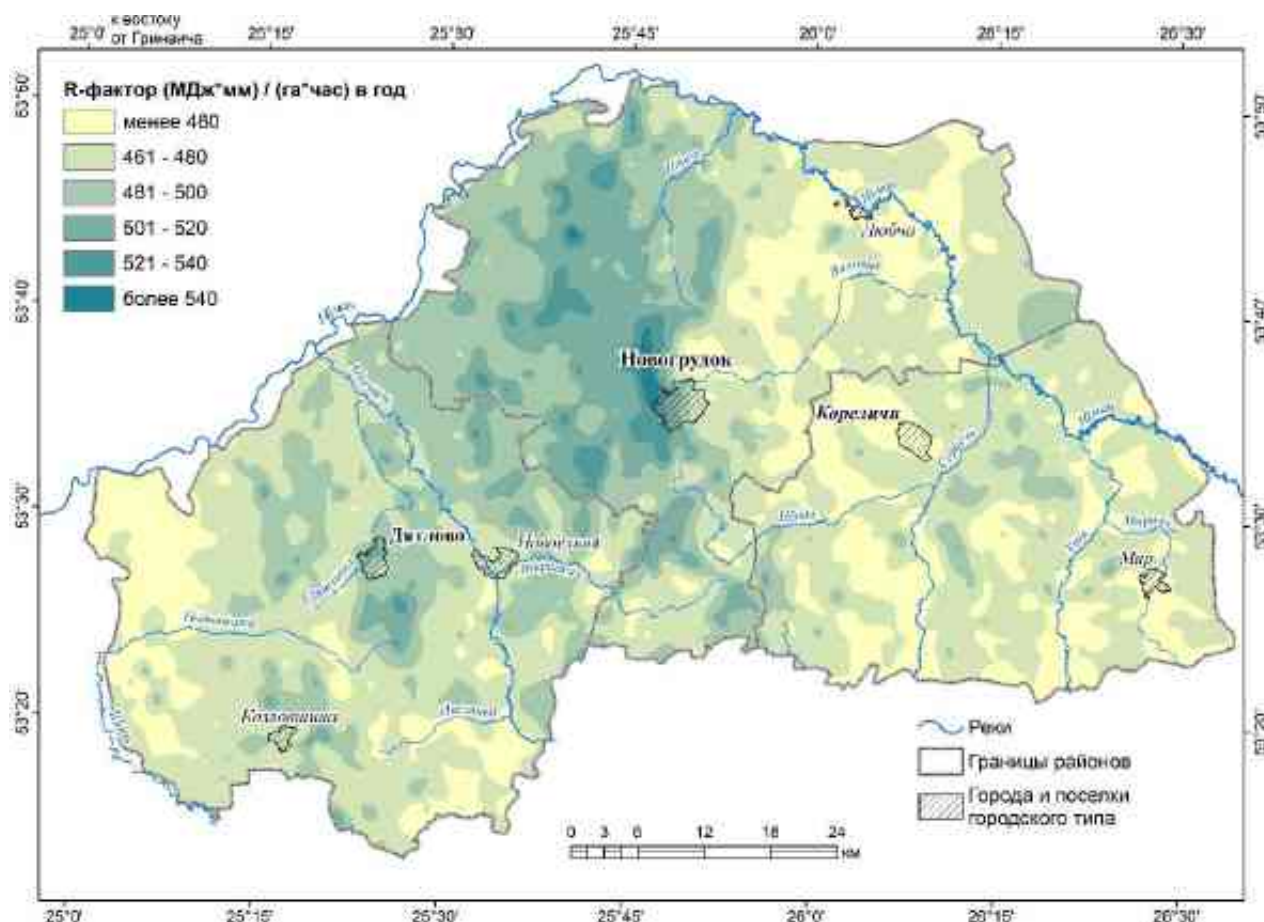


Рис. 5. Пространственное распределение эрозионного индекса дождевых осадков (R-фактор) с начала мая по конец сентября (составлено по данным [25])

Fig. 5. Spatial distribution of the rainfall erosion index (R-factor) from the beginning of May to the end of September (compiled according to [25])

Минимальные значения индекса NDVI за вегетационный период рассчитаны на основе цифровой обработки трёх космических снимков Sentinel-2 (даты съёмки: 11 мая 2021 г., 1 мая 2023 г. и 28 сентября 2023 г.) с помощью инструментов «Калькулятор раstra» и «Статистика по ячейкам» в ArcGIS, что позволило определить в каждом пикселе наименьшие значения индекса NDVI за период вегетации в 2021–2023 гг. Среди сельскохозяйственных земель более высокие значения C-фактора (0,04–0,05) характерны для пахотных земель, которые в начале вегетационного периода или после уборки урожая не покрыты растительностью. Для луговых и лесных земель преобладают значения C-фактора в диапазоне от 0,026 до 0,035, что обусловлено более высоким уровнем вегетации растительного покрова, поэтому луговые земли в меньшей степени подвержены водной эрозии по сравнению с пахотными (рис. 6).

ЦМР FABDEM использована для расчёта топографического индекса увлажнённости (Topographic Wetness Index – TWI) в ГИС SAGA. Высокие значения данного индекса (11,0 и более) характерны для речных долин и плоских понижений рельефа, которые выделяются высокой влажностью почв. Индекс TWI имеет более высокие значения на водоразделах по сравнению с участками склонов, где проявляется плоскостной смыв почв. Сильносмытые и среднесмытые почвы в центральной части Новогрудского района имеют средние значения индекса TWI 7,4 и 7,9 соответственно, в то время как слабосмытые и намывные почвы – 8,6 (рис. 7).

На основе количественного анализа факторов, учитывающих информацию о рельефе, почвенном покрове, климате и растительности, выполнена относительная оценка рисков проявления водной эрозии почв на сельскохозяйственных землях. Песчаные почвы преобладают на западе Новогрудской возвышенности и на северо-западе Новогрудского района, а переувлажнённые почвы доминируют в пределах речных долин Немана, Сервечи, Уши, Молчади и к юго-востоку и северо-востоку от Любчи и для них оценка степени проявления водной эрозии не выполнялась из-за её отсутствия или минимального уровня.

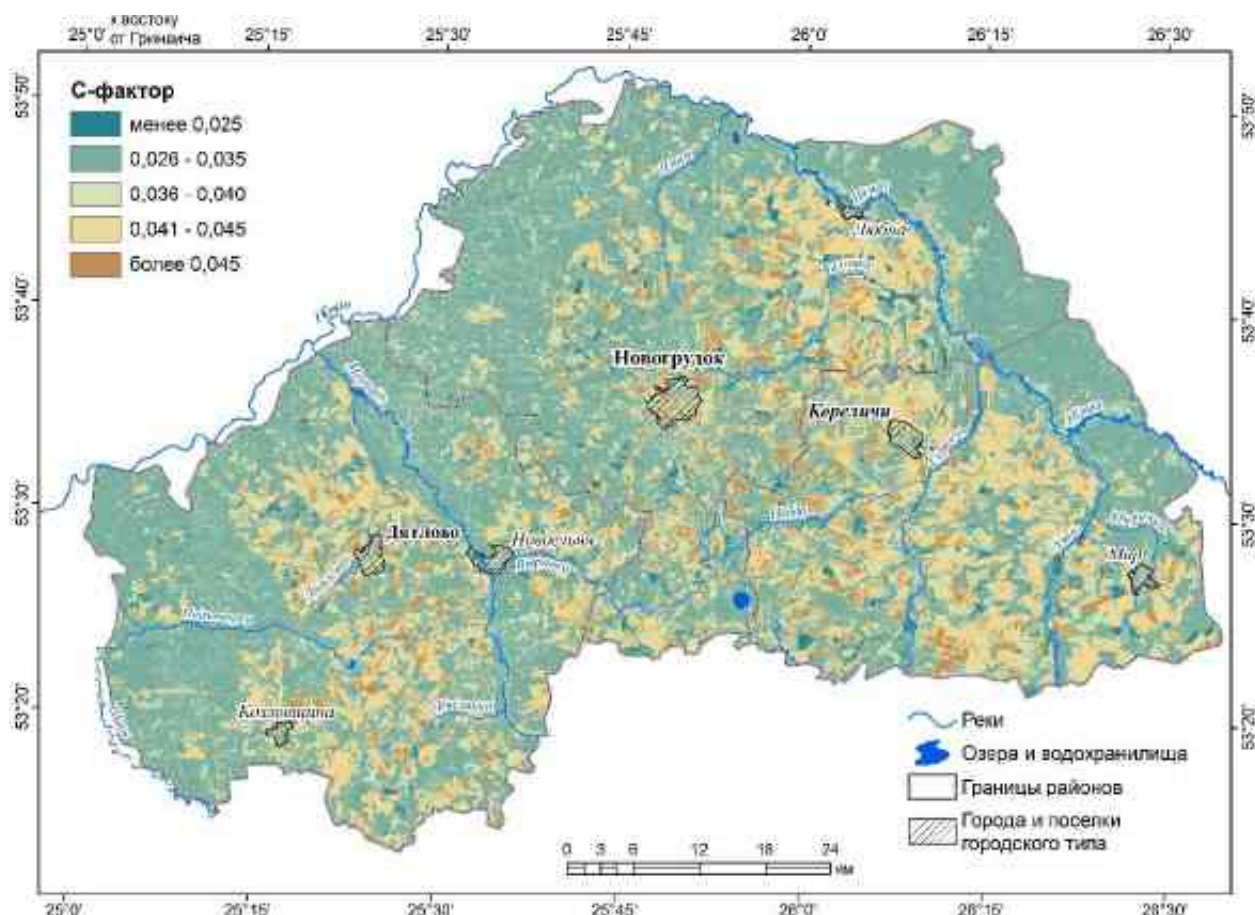


Рис. 6. Дифференциация значений фактора растительного покрова (С-фактор) для исследуемой территории

Fig. 6. Differentiation of the values of the vegetation cover factor (C-factor) for the study area

Для территорий со сглаженным рельефом (юго-восток Кореличского района, северная часть Новогрудского района, запад Новогрудской возвышенности) характерны низкие и минимальные значения (менее 2,0) оценки рисков проявления водной эрозии. В центральной части Новогрудской возвышенности и на её восточных склонах представлены контуры почв с повышенной и высокой степенью риска (более 5,0) к процессам водной эрозии, что обусловлено высокими значениями уклона рельефа, а также концентрацией долин небольших рек и овражно-балочных форм рельефа. На основе геоинформационного анализа крупномасштабной почвенной карты центральной части Новогрудского района установлено, что относительная оценка рисков проявления водной эрозии превышает 2,0 для эродированных почв (рис. 8).

Для выделения сильноэродированных почв были использованы не только значения относительной оценки рисков проявления водной эрозии, превышающие 10,0, но и высокие значения LS-фактора (более 3,0) и вертикального расчленения рельефа (более 39 м/км²), а также топографический индекс увлажнённости, который при высокой степени эродированности не превышает 7,7. Следует отметить, что для выбора значений, соответствующих критерию по оценке уязвимости почв к процессам водной эрозии, применялись такие инструменты, как «Калькулятор раstra» и «Извлечь по атрибутам». Крупномасштабные почвенные карты содержат информацию для территорий сельскохозяйственных организаций, в пределах которых расположены не только пахотные и луговые земли, преобладающие в их структуре, но и земли под застройкой и общего пользования, а также под древесно-кустарниковой растительностью. Пространственная информация о расположении сельскохозяйственных земель для исследуемой территории получена на основе автоматизированного дешифрирования космического снимка Sentinel-2 за 1 мая 2023 г. Для конвертации векторного слоя сельскохозяйственных земель в растровый формат использован инструмент «Полигон в растр», а для выборки контуров почв, уязвимых к водной эрозии, в пределах сельскохозяйственных земель применен инструмент «Булев оператор And». Затем полученный слой конвертирован в векторный формат, что является необходимым этапом для проведения геометрической генерализации, в результате которой происходит удаление контуров с площадью

до 0,2 га, а также выполняется заполнение небольших пробелов внутри участков эродированных почв и сглаживание контуров.

Для идентификации среднесмытых почв использованы значения оценки рисков проявления водной эрозии от 4,5 до 10,0, а в случае, когда данный показатель превышает 10,0, проводится выборка только тех участков, где вертикальное расчленение рельефа составляет менее 39 м/км², LS-фактор – менее 3,0, а индекс TWI – более 7,7. Слабосмытые почвы отличаются преобладанием значений относительной оценки уязвимости к водной эрозии в пределах от 2,0 до 4,5. Векторные слои слабо-, средне- и сильносмытых почв объединены в один класс пространственных объектов, содержащий в себе три подкласса по степени эродированности.

Пространственное пересечение векторных слоев эродированных почв, сельскохозяйственных земель и административно-территориальных единиц (районов, сельсоветов), а также геоинформационный анализ атрибутивных таблиц позволяет проанализировать внутрирегиональную дифференциацию почв по степени уязвимости к водной эрозии.

В результате применения данной методики определена общая площадь почв, подверженных плоскостному смыву, которая составила 20 847,6 га для исследуемой территории. В пределах Новогрудской возвышенности площадь эродированных почв изменяется от 3403,4 до 9630,0 га для Дятловского и Новогрудского районов соответственно. Сильносмытые почвы имеют очень низкий удельный вес (1,3 %) в структуре эродированных почв Дятловского района, в то время как для Новогрудского и Кореличского районов – около 9,0 %. Среди эродированных почв Дятловского района преобладают слабосмытые (73,6 %), что обусловлено не только более низкими значениями морфометрических показателей рельефа по сравнению с Новогрудским и Кореличским районами, но и различиями в гранулометрическом составе и генезисе почвообразующих пород (см. таблицу).

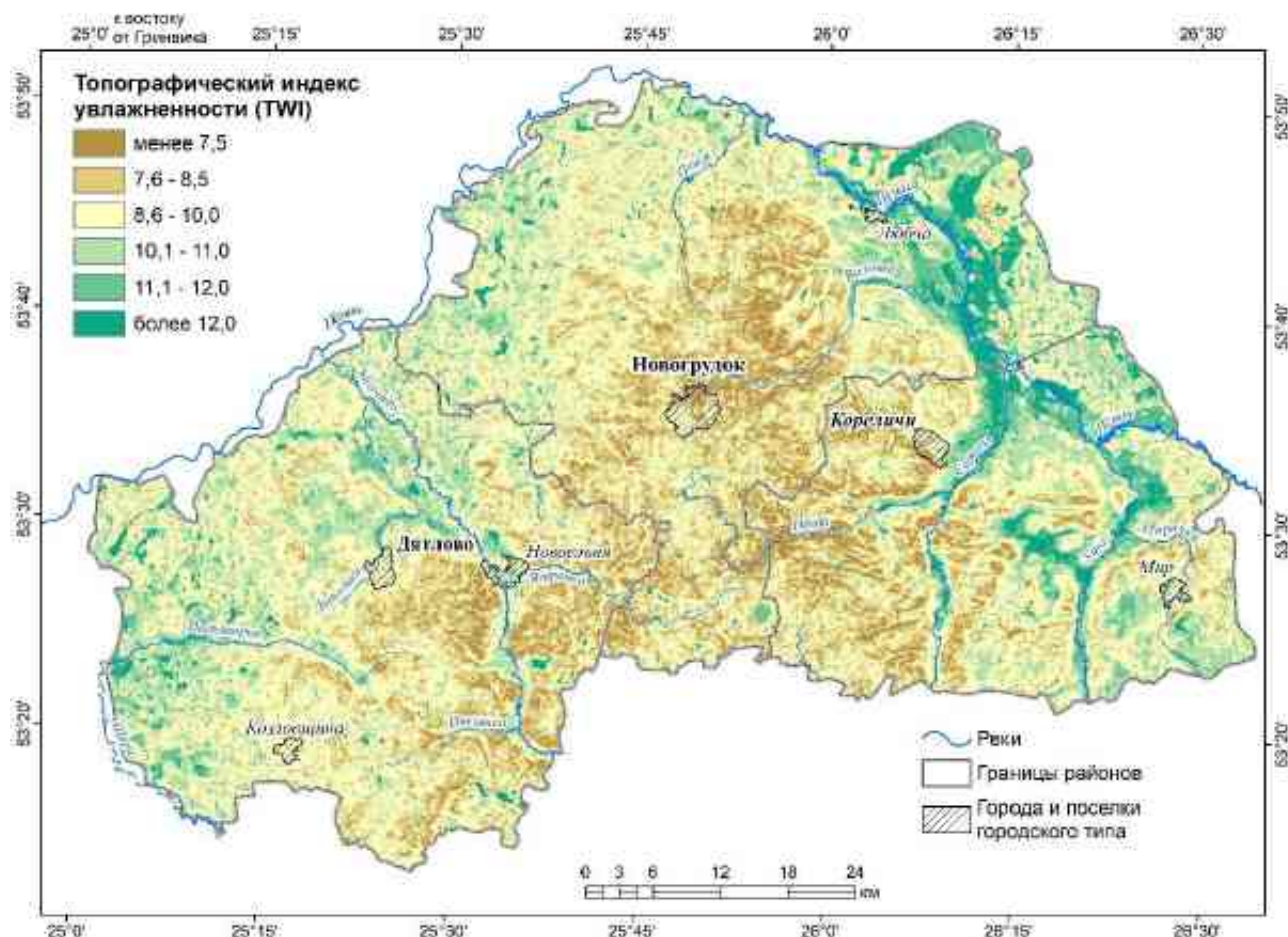


Рис. 7. Пространственное распределение топографического индекса увлажненности (TWI) на территории Новогрудской возвышенности

Fig. 7. Spatial distribution of topographic wetness index (TWI) on the territory of the Novogrudok upland

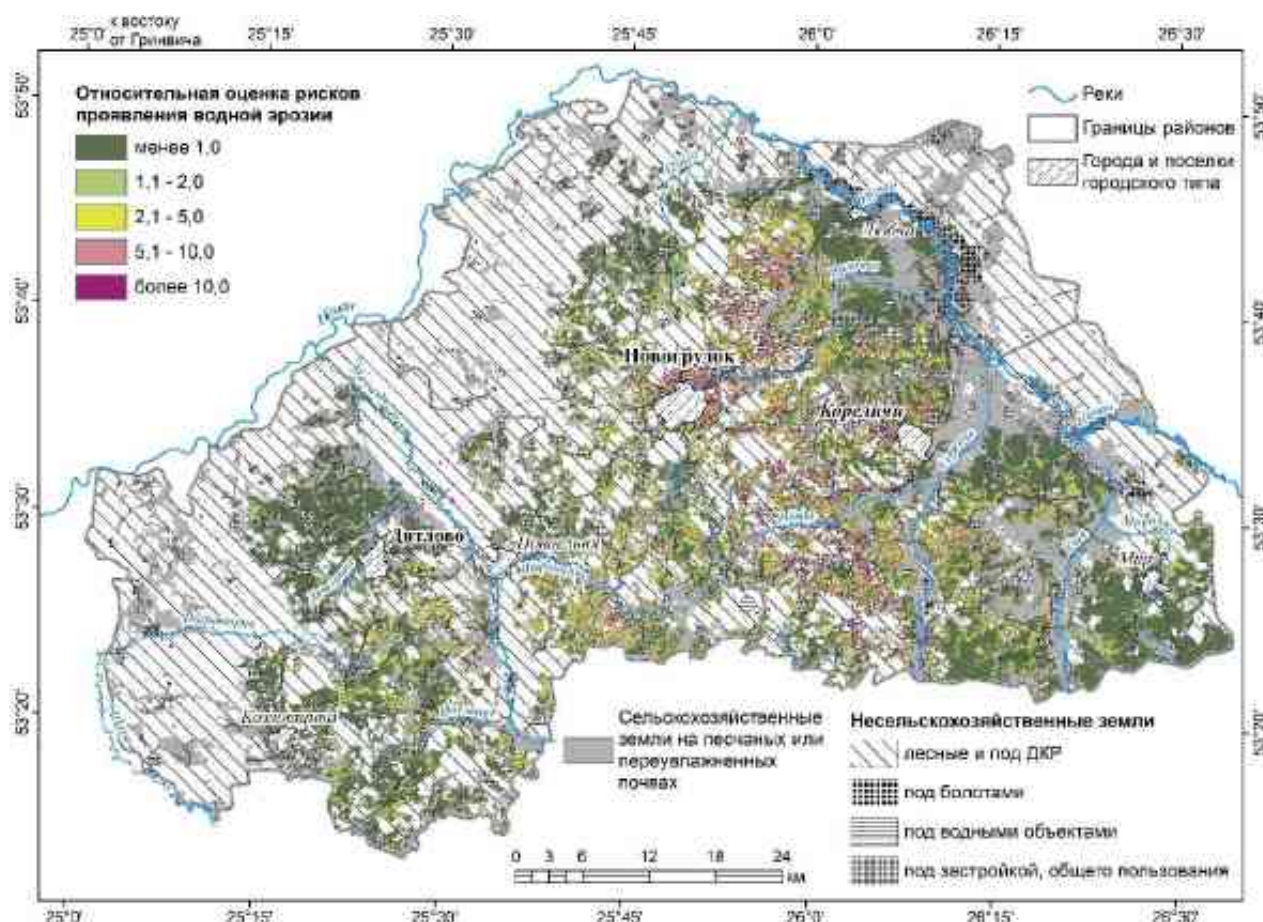


Рис. 8. Пространственное распределение относительной оценки рисков проявления водной эрозии почв сельскохозяйственных земель

Fig. 8. Spatial distribution of the relative risk assessment of water erosion of agricultural soils

Площади почв, подверженных водной эрозии, по основным районам Новогрудской возвышенности, га

Areas of soils subject to water erosion in the main districts of the Novogrudok Upland, ha

Район	Почвы, подверженные водной эрозии (плоскостному смыву)			
	всего	в том числе по степени проявления		
		слабосмытые	среднесмытые	сильносмытые
Новогрудский	9630,0	4608,1	4137,4	884,5
Кореличский	7814,2	3523,9	3586,0	704,3
Дятловский	3403,4	2506,7	852,7	44,0

По полученным данным была проанализирована дифференциация сельсоветов по удельному весу эродированных почв в составе сельскохозяйственных земель. Следует отметить, что в пределах исследуемой территории наблюдается выраженная неравномерность распределения показателя: наиболее высокие значения сосредоточены в направлении востока – северо-востока от Новогрудка и в западной части Кореличского района, где преобладают значения 15,1–25,0 % и более 25,0 %, формируя зону повышенной эродированности. Напротив, периферийные зоны (прежде всего северо-запад и запад, а также отдельные участки северо-восточной окраины) характеризуются пониженными значениями – чаще всего менее 2,0 % и 2,1–5,0 %, что указывает на более благоприятные условия сохранности почвенного покрова и меньшую выраженность факторов водной эрозии на этих участках. Экстремальные значения показателя подчёркивают контраст территории: максимальный удельный вес эродированных почв отмечен в Броднянском сельсовете (32,8 %), к группе очень высоких также относятся Ладеницкий (27,2 %) и Воробьевичский (24,0 %) сельсоветы; минимум зафиксирован

в Жуковщинском сельсовете (0,3 %), близкие к нему низкие значения также сосредоточены в Поречском (1,0 %) и Еремичском (1,0 %) сельсоветах.

Дополнительная информация представлена круговыми диаграммами, размещёнными в границах сельсоветов, которые показывают структуру эродированных почв по степени смытости (слабо-, средне- и сильносмытые). Анализ круговых диаграмм свидетельствует, что в большинстве сельсоветов ведущую долю в составе эродированных почв составляют слабосмытые, однако для территорий с повышенной общей эродированностью заметно увеличивается вклад среднесмытых и сильносмытых разновидностей, что указывает на более интенсивное развитие эрозионных процессов и потенциально более высокий риск деградации земель.

Можно отметить, что распределение эродированных почв по сельсоветам характеризуется наличием центрально-восточной зоны повышенной эродированности и постепенным переходом к более низким значениям на периферии, что важно учитывать при оценке степени эрозионной опасности и приоритетности противоэрозионных мероприятий на сельскохозяйственных землях (рис. 9).

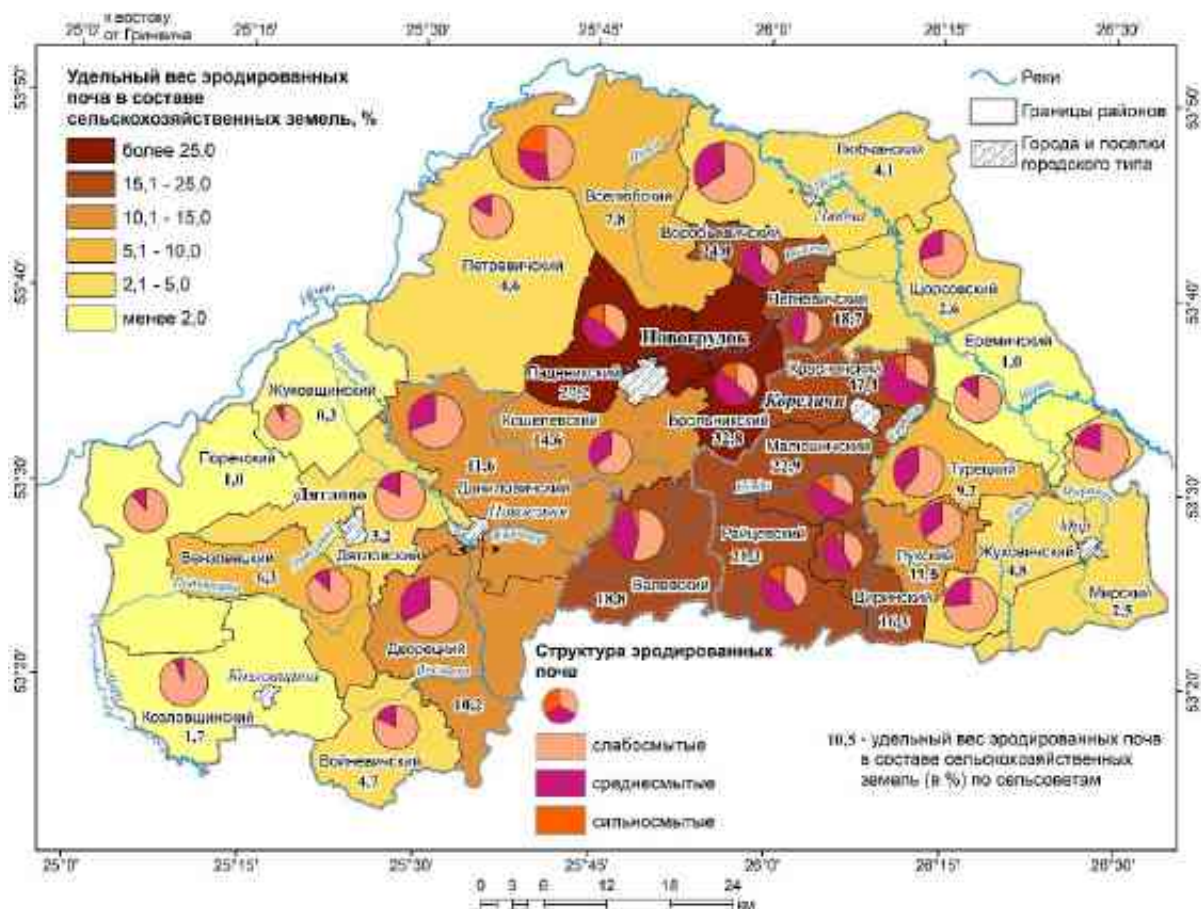


Рис. 9. Дифференциация сельсоветов по удельному весу эродированных почв в составе сельскохозяйственных земель

Fig. 9. Differentiation of selsoviets by the proportion of eroded soils in agricultural lands

Для количественной оценки точности выполнено сопоставление результатов, полученных на основе изложенной методики, и статистических данных о площади почв, подверженных плоскостному смыву, из практического пособия [27]. Следует отметить, что расхождения по площади дифференцируются от +3,7 % для Новогрудского района до +26,7 и –29,9 % для Дятловского и Кореличского районов соответственно, так как за период с 2001 по 2021–2023 гг. произошло изменение площади эродированных почв в связи с переводом контуров почв, подверженных сильному плоскостному смыву, в состав земель, занятых лесной и древесно-кустарниковой растительностью. В Дятловском районе увеличение площади эродированных почв может быть связано с переводом наиболее плодородных участков улучшенных луговых земель в состав пахотных, а уменьшение площади почв сельскохозяйственных земель, подверженных плоскостному смыву, в Кореличском районе обусловлено ростом земель под древесно-кустарниковой растительностью на крутых склонах.

Заключение. В работе выполнена геоинформационная оценка уязвимости почв к водной эрозии на сельскохозяйственных землях Новогрудской возвышенности на основе комплексного учета рельефа, почвенного покрова, климатических параметров и растительности. Для этого использованы морфометрические показатели по ЦМР FABDEM (включая LS-фактор и индекс TWI), характеристики почв (коэффициент фильтрации и коэффициент Водогребцкого), климатические индикаторы (эрозионный индекс дождей осадков R и запасы воды в снеге перед снеготаянием), а также C-фактор, рассчитанный по космическим снимкам Sentinel-2 через минимальные значения спектрального индекса NDVI. Интеграция факторов в единую расчётную схему позволила получить пространственно детализированную карту относительных рисков проявления водной эрозии и на её основе выполнить выделение слабо-, средне- и сильноэродированных почв с применением пороговых значений (в том числе по LS-фактору, вертикальному расчленению рельефа и индексу TWI) и последующей генерализацией контуров.

Установлено, что минимальные риски характерны для сглаженных поверхностей и участков с песчаными и переувлажнёнными почвами, тогда как зоны повышенной эрозионной опасности приурочены к центральной части возвышенности и восточным склонам с более расчленённым рельефом. Общая площадь почв, подверженных плоскостному смыву, составила 20 847,6 га; наибольшие значения отмечены в Новогрудском (9630,0 га) и Кореличском (7814,2 га) районах, наименьшие – в Дятловском (3403,4 га). Слабоэродированные почвы преобладают в структуре эродированных почв Дятловского района (73,6 %), а доля сильноэродированных почв минимальна (1,3 %); в Новогрудском и Кореличском доля сильноэродированных почв достигает около 9,0 %.

Таким образом, полученные результаты могут применяться для планирования противоэрозионных мероприятий и мониторинга состояния сельскохозяйственных земель.

Список использованных источников

1. Горбачёва, Е. Н. Применение универсального уравнения потерь почвы от эрозии (RUSLE) при оценке интенсивности водно-эрозионных процессов на основе ГИС / Е. Н. Горбачёва // Почвоведение и агрохимия. – 2011. – № 2 (47). – С. 42–51.
2. Лазовик, Г. С. Оценка эрозионной опасности почв и ее картографирование с использованием ГИС-технологий / Г. С. Лазовик, А. А. Топаз // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2021. – № 2. – С. 18–31. – DOI: 10.33581/2521-6740-2021-2-18-31.
3. Кухарик, Е. А. Особенности проявления современных водно-эрозионных процессов на территории Центральной Беларуси / Е. А. Кухарик, А. В. Матвеев // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 6. – С. 622–630. – DOI: 10.29235/1561-8323-2022-66-6-622-630.
4. Козлов, Е. А. Использование ГИС-технологий для оценки активности эрозии и денудации рельефа в пределах учебной географической станции БГУ «Западная Березина» / Е. А. Козлов, В. А. Генин, Д. М. Курлович // Земля Беларуси. – 2015. – № 4. – С. 41–44.
5. Червань, А. Н. Эрозионные агроландшафты Беларуси: борьба с эрозией почв и территориальное планирование землепользования / А. Н. Червань, А. Ф. Черныш // Эрозионные и русловые процессы : сб. науч. тр. – М. : МГУ, 2020. – Вып. 7. – С. 338–356.
6. Горбачёва, Е. Н. Автоматизированное дешифрирование почв, подверженных водно-эрозионным процессам / Е. Н. Горбачёва // Почвоведение и агрохимия. – 2011. – № 1 (46). – С. 46–55.
7. Кравцова, В. И. Космические методы исследования почв : учеб. пособие для студентов вузов / В. И. Кравцова. – М. : Аспект Пресс, 2005. – 190 с.
8. Abdel-Kader, F. H. Assessment and monitoring of land degradation in the northwest coast region, Egypt using Earth observations data / F. H. Abdel-Kader // Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2019. – Vol. 22. – P. 165–173.
9. Sujatha, E. R. Spatial prediction of erosion risk of a small mountainous watershed using RUSLE: A case-study of the Palar Sub-Watershed in Kodaikanal, South India / E. R. Sujatha, V. Sridhar // Water. – 2018. – Vol. 10, № 1608. – P. 1–17.
10. Wang, S. Spatial and temporal variability of soil erosion in Northeast China from 2000 to 2020 / S. Wang, X. Xu, L. Huang // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, № 225. – P. 1–21.
11. Безгодова, О. В. Морфометрический анализ территории верховья р. Иркут / О. В. Безгодова // Региональные геосистемы. – 2023. – Т. 47, № 2. – С. 282–295. – DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-2-282-295.
12. Буряк, Ж. А. Эрозионная опасность пахотных земель Белгородской области / Ж. А. Буряк, А. Г. Нарожная, О. А. Маринина // Региональные геосистемы. – 2023. – Т. 47, № 1. – С. 101–115. – DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-1-101-115.
13. Лисецкий, Ф. Н. Современные проблемы эрозиоведения / Ф. Н. Лисецкий, А. А. Светличный, С. Г. Черный. – Белгород : Константа, 2012. – 455 с.
14. Кислицын, Д. А. Геоинформационный анализ динамики и структуры классов земельного покрытия Новогрудской возвышенности / Д. А. Кислицын, Н. В. Клебанович // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2024. – № 1. – С. 126–140.

15. Национальный доклад: Уязвимость и адаптация к изменению климата в Беларуси. – Мн. : Форум восточных стран по климату, 2014. – 45 с.
16. Данилович, И. С. Оценка климатической уязвимости территории Беларуси на основе безразмерных климатических индексов / И. С. Данилович // Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно-методическое обеспечение и практическое решение : материалы Междунар. науч.-практич. конференции, посвящ. 60-летию науч.-исслед. лаборатории экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики Бел. гос. ун-та, Минск, 9–11 нояб. 2022 г. / Бел. гос. ун-т, фак. географии и геоинформатики ; [редкол.: Д. С. Воробьев (отв. ред.) и др.]. – Мн., 2022. – С. 29–32.
17. Яцухно, В. М. Система критериев и индикаторов для оценки уязвимости почв агроландшафтов к климатическим изменениям / В. М. Яцухно, С. С. Бачила // Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию каф. общего земледования и гидрометеорологии Бел. гос. ун-та, Минск, 11–13 окт. 2023 г. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: П. С. Лопух (гл. ред.), Ю. А. Гледко, Е. В. Логинова. – Мн., 2023. – С. 482–488.
18. Оценка рисков и уязвимости к изменениям климата на локальном уровне – Туямунский гидроузел – Узбекистан/Туркменистан / Г. Петерсен, Р. Бош, Д. Дядин [и др.]. – Алматы, 2021. – 118 с.
19. Лепешев, А. А. Овражная эрозия Новогрудской возвышенности / А. А. Лепешев. – Мн : БГПУ, 2004. – 118 с.
20. Нацыянальны атлас Беларусі. – Мн. : Белкартаграфія, 2024. – 348 с.
21. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed / L. Hawker, P. Uhe, L. Paulo [et al.] // Environmental Research Letters. – 2022. – Vol. 17, № 024016. – P. 1–11. – DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
22. Червань, А. Н. Опыт изучения динамики землепользования на основе геосистемного подхода на примере Новогрудской возвышенности Беларуси / А. Н. Червань, Д. А. Кислицын // Региональные геосистемы. – 2025. – Т. 49, № 3. – С. 434–449. – DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-434-449.
23. OpenStreetMap. 2025. – URL: <http://download.geofabrik.de/europe/belarus.html> (date of access: 22.11.2025).
24. Червань, А. Н. Геоинформационная формализация и геостатистический анализ почвенного покрова Беларуси : учеб.-метод. пособие / А. Н. Червань. – Мн. : БГУ, 2025. – 175 с.
25. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records / P. Panagos, P. Borrelli, K. Meusburger [et al.] // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7. – Art. 4175. – P. 1–13.
26. Моделирование водной эрозии с использованием уравнения RUSLE в масштабе землепользования / А. С. Кузнецова, К. В. Краснощек, А. В. Дергунов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 3. – С. 145–154.
27. Почвы сельскохозяйственных земель Республики Беларусь : [практическое пособие] / Комитет по земельным ресурсам, геодезии и картографии при Совете Министров Республики Беларусь. – Мн. : Оргстрой, 2001. – 428 с.

References

1. Gorbacheva E. N. *Primeneniye universal'nogo uravneniya poter' pochvy ot erozii (RUSLE) pri otsenke intensivnosti vodno-erozionnykh protsessov na osnove GIS* [RUSLE Model implementation for estimation intensivity of water erosion processes on Belarusian soil cover]. *Pochvovedeniye i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2011, vol. 2, no. 47, pp. 42–51. (in Russian)
2. Lazovik H. S., Topaz A. A. *Otsenka erozionnoy opasnosti pochv i yeye kartografirovaniye s ispol'zovaniyem GIS-tekhnologiy* [Assessment of soil erosion hazard and its mapping using GIS technologies]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya = Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*, 2021, vol. 2, pp. 18–31, DOI: 10.33581/2521-6740-2021-2-18-31. (in Russian)
3. Kukharik E. A., Matveyev A. V. *Osobennosti proyavleniya sovremennykh vodno-erozionnykh protsessov na territorii Tsentral'noy Belarusi* [Features of manifestation of modern water-erosion processes in the Central Belarus territory]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 6, pp. 622–630, DOI: 10.29235/1561-8323-2022-66-6-622-630. (in Russian)
4. Kazlou Ya. A., Genin U. A., Kurlovich D. M. *Ispol'zovaniye GIS-tekhnologiy dlya otsenki aktivnosti erozii i denudatsii rel'yefa v predelakh uchebnoy geograficheskoy stantsii BGU "Zapadnaya Berezina"* [Using of GIS-technologies for assessment of activity of erosion and denudation of landforms within the Western Berezina educational geographical station of the Belarusian State University]. *Zemlya Belarusi = Land of Belarus*, 2015, no. 4, pp. 41–44. (in Russian)
5. Chervan A. N., Chernysh A. A. *Erozionnyye agrolandshafty Belarusi: bor'ba s eroziyey pochv i territorial'noye planirovaniye zemlepol'zovaniya* [Erosion agrolandscapes of Belarus: soil erosion control and land use territorial planning]. *Erozionnyye i ruslovyye protsessy. Sbornik nauchnykh trudov = Erosion and channel processes. Collection of scientific papers*, 2020, vol. 7, pp. 338–356. (in Russian)
6. Gorbacheva E. N. *Avtomatizirovannoye deshifirovaniye pochv, podverzhennykh vodno-erozionnym protsessam* [Automated interpretation of soils subject to water-erosion processes]. *Pochvovedeniye i agrokhimiya = Soil science and agrochemistry*, 2011, vol. 1, no. 46, pp. 46–55. (in Russian)
7. Kravtsova V. I. *Kosmicheskiye metody issledovaniya pochv: uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov* [Space methods of soil research: a textbook for university students]. Moscow, Aspect Press Publ., 2005, 190 p. (in Russian)
8. Abdel-Kader F. H. Assessment and monitoring of land degradation in the northwest coast region, Egypt using Earth observations data. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2019, vol. 22, pp. 165–173.

9. Sujatha E. R., Sridhar V. Spatial prediction of erosion risk of a small mountainous watershed using RUSLE: A case-study of the Palar Sub-Watershed in Kodaikanal, South India. *Water*, 2018, vol. 10, no. 1608, pp. 1–17.
10. Wang S., Xu X., Huang L. Spatial and temporal variability of soil erosion in Northeast China from 2000 to 2020. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, no. 225, pp. 1–21.
11. Bezgodova O. V. *Morfometricheskii analiz territorii verkhov'ya reki Irkut* [Morphometric analysis of the Upper Irkut river territory]. *Regional'nyye geosistemy = Regional Geosystems*, 2023, vol. 47, no. 2, pp. 282–295, DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-2-282-295. (in Russian)
12. Buryak Zh. A., Narozhnyaya A. G., Marinina O. A. *Erozionnaya opasnost' pakhotnykh zemel' Belgorodskoy oblasti* [Erosion risk of arable land in the Belgorod Oblast]. *Regional'nyye geosistemy = Regional Geosystems*, 2023, vol. 47, no. 1, pp. 101–115, DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-1-101-115. (in Russian)
13. Lisetsky F. N., Svetlichny A. A., Cherny S. G. *Sovremennyye problemy erozirovedeniya* [Modern problems of erosion studies]. Belgorod, Constanta Publ., 2012, 455 p. (in Russian)
14. Kislitsyn D. A., Klebanovich N. V. *Geoinformatsionnyy analiz dinamiki i struktury klassov zemel'nogo pokrytiya Novogrudskoy vozvyshehnosti* [Geoinformation analysis of the dynamics and structure of land cover classes of the Novogrudok Upland]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya. = Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*, 2024, vol. 1, pp. 126–140. (in Russian)
15. *Natsional'nyy doklad: Uyazvimost' i adaptatsiya k izmeneniyu klimata v Belarusi* [National Report: Vulnerability and adaptation to climate change in Belarus]. Minsk, Eastern Climate Forum Publ., 2014, 45 p. (in Russian)
16. Danilovich I. S. *Otsenka klimaticheskoy uyazvimosti territorii Belarusi na osnove bezrazmernykh klimaticheskikh indeksov* [Assessment of climate vulnerability of the territory of Belarus based on dimensionless climate indices]. *Aktual'nyye voprosy ustoychivogo prirodopol'zovaniya: nauchno-metodicheskoye obespecheniye i prakticheskoye resheniye: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu nauchno-issledovatel'skoy laboratorii ekologii landshaftov fakul'teta geografii i geoinformatiki Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta* [Current issues of sustainable nature management: scientific and methodological support and practical solutions: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of the Research Laboratory of Landscape Ecology of the Faculty of Geography and Geoinformatics of the Belarusian State University]. Minsk, 2022, pp. 29–32. (in Russian)
17. Yatsuhno V. M., Bachila S. S. *Sistema kriteriyev i indikatorov dlya otsenki uyazvimosti pochv agrolandshaftov k klimaticheskim izmeneniyam* [System of criteria and indicators for assessing the vulnerability of agricultural landscape soils to climate change]. *Fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya v gidrometeorologii: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchayashchennoy 50-letiyu kafedry obshchego zemlevedeniya i gidrometeorologii Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta* [Fundamental and applied research in hydrometeorology: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 50th anniversary of the Department of General Geoscience and Hydrometeorology of the Belarusian State University]. Minsk, 2023, pp. 482–488. (in Russian)
18. Petersen G., Bosh R., Dyadin D., Kattarossi A., Konstantin K. *Otsenka riskov i uyazvimosti k izmeneniyam klimata na lokal'nom urovne – Tuyamuyunskiy gidrouzel – Uzbekistan/Turkmenistan* [Local-scale risk and vulnerability assessment to climate change – Tuyamuyun hydroelectric complex – Uzbekistan/Turkmenistan]. Almaty, 2021, 118 p. (in Russian)
19. Lepeshev A. A. *Ovrazhnaya eroziya Novogrudskoy vozvyshehnosti* [Gully erosion of the Novogrudok Upland]. Minsk, BSPU, 2004, 118 p. (in Russian)
20. *Natsional'nyi atlas Belarusi = National Atlas of Belarus*. Minsk, Belkatografiya Publ., 2024, 348 p. (in Belarussian).
21. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 2022, vol. 17, № 024016, pp. 1–11, DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
22. Chervan A. N., Kislitsyn D. A. *Opyt izucheniya dinamiki zemlepol'zovaniya na osnove geosistemnogo podkhoda na primere Novogrudskoy vozvyshehnosti Belarusi* [Studying land use dynamics under the geosystem approach on the example of the Belarus Novogrudok Upland]. *Regional'nyye geosistemy = Regional Geosystems*, 2025, vol. 49, no. 3, pp. 434–449. – DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-434-449. (in Russian)
23. OpenStreetMap (2025). URL: <http://download.geofabrik.de/europe/belarus.html> (accessed November 22, 2025).
24. Chervan A. N. *Geoinformatsionnaya formalizatsiya i geostatisticheskii analiz pochvennogo pokrova Belarusi* [Geoinformation formalization and geostatistical analysis of the soil cover of Belarus]. Minsk, BSU Publ., 2025, 175 p. (in Russian)
25. Panagos P., Borelli P., Meusburger K., e. a. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, art. 4175, pp. 1–13.
26. Kuznetsova A. S., Krasnoshchekov K. V., Dergunov A. V., Erunova M. G., Makarov D. S., Kharlamov D. V., Yakubailik O. E. *Modelirovaniye vodnoy erozii s ispol'zovaniyem uravneniya RUSLE v masshtabe zemlepol'zovaniya* [Modeling water erosion using the RUSLE equation at the land use scale]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern problems of remote sensing of the Earth from Space*, 2024, vol. 21, no. 3, pp. 145–154. (in Russian)
27. *Pochvy sel'skokhozyaystvennykh zemel' Respubliki Belarus': [prakticheskoye posobiye]* [Soils of agricultural lands of the Republic of Belarus: [practical guide]]. *Komitet po zemel'nykh resursam, geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov Respubliki Belarus'* [Committee on Land Resources, Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the Republic of Belarus]. Minsk, Orgstroy Publ., 2001, 428 p. (in Russian)

Информация об авторах

Кислицын Дмитрий Андреевич – аспирант кафедры почвоведения и геоинформационных систем, преподаватель, Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: dimas_13082000@mail.ru

Небышинец Арина Михайловна – аспирант кафедры общего землеведения и гидрометеорологии, преподаватель, Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: arinanebyshinec@gmail.com

Клебанович Николай Васильевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ООО «Белорусское географическое общество» (ул. Курчатова, 7, 220064, г. Минск, Беларусь). E-mail: n_klebanovich@inbox.ru

Information about the authors

Dmitry A. Kislitsyn – Postgraduate student of department of Soil Science and Geographic Information systems, lecturer, Belarusian State University (16, Leningradskaya St., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: dimas_13082000@mail.ru

Arina M. Nebyshynets – Postgraduate student of department of General Geography and Hydrometeorology, lecturer, Belarusian State University (16, Leningradskaya St., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: arinanebyshinec@gmail.com

Nikolay V. Klebanovich – D. Sc. (Agriculture), Full Professor, Belarusian Geographical Society (7, Kurchatov St., 220064, Minsk, Belarus). E-mail: n_klebanovich@inbox.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-87-105>
УДК 639.2:504.4:627.8:338.48

Поступила в редакцию 01.04.2026
Received 01.04.2026

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РУСЛОВОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ЗЕЛЬВЯНСКОЕ С ЦЕЛЮ ЕГО ОЗДОРОВЛЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ РЕКРЕАЦИОННОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ (ГРОДНЕНСКАЯ ОБЛАСТЬ, БЕЛАРУСЬ)

Л. Н. Гертман, Б. В. Адамович, Ю. С. Давидович,
И. А. Рудаковский, О. А. Макаревич, Ю. К. Верес

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования гидрологического режима, гидрохимических и гидробиологических показателей водохранилища Зельвянское в течение 2024 г. для обеспечения оздоровления и повышения рекреационной привлекательности водоема, согласно разработанному в 2023 г. биологическому обоснованию. Оценено изменение гидрологического режима водохранилища в зависимости от сезонного регулирования уровня режима. Проанализирован количественный и качественный состав фитопланктона водохранилища с выявлением потенциально токсичных форм цианобактерий. Проведен анализ собранных данных, разработан комплекс мероприятий по восстановлению и оздоровлению среды обитания рыб, стабилизации ресурсов ихтиофауны и повышения рекреационной привлекательности водоема. Предлагаемые авторами биомелиоративные мероприятия с учетом снижения степени зарастания водохранилища до пределов необходимой целесообразности и контроля дальнейшего развития в нем макрофитной растительности представляют собой повышение рыбопродуктивности водоема и расширение видового состава рыб, привлекательных для потенциальных туристов, с одновременным уменьшением численности менее привлекательных. С учетом характеристики среды обитания рыб и кормовой емкости водохранилища, а также рекреационной направленности зарыбления, в качестве объектов для вселения рекомендуются такие виды рыб, как сом европейский (с целью формирования самовоспроизводящегося стада) и щука (для увеличения численности хищников).

Ключевые слова: водохранилище Зельвянское; данные дистанционного зондирования Земли; гидробиологический мониторинг; туристско-рекреационная привлекательность.

Для цитирования. Гертман Л. Н., Адамович Б. В., Давидович Ю. С., Рудаковский И. А., Макаревич О. А., Верес Ю. К. Оценка состояния руслового водохранилища Зельвянское с целью его оздоровления и повышения рекреационной привлекательности (Гродненская область, Беларусь) // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 87–105.

ASSESSMENT OF A ZELVYANSKOYE RIVERINE RESERVOIR FOR ITS RESTORATION AND ENHANCEMENT OF RECREATIONAL VALUE (GRODNO REGION, BELARUS)

L. N. Hertman, B. V. Adamovich, Yu. S. Davidovich,
I. A. Rudakovsky, O. A. Makarevich, Yu. K. Veres

Belarussian State University, Minsk, Belarus

Abstract. The article presents the results of a study of the hydrological regime, as well as hydrochemical and hydrobiological parameters of the Zelvyanskoye Reservoir during 2024, in order to support fish stocking activities in accordance with the biological justification developed in 2023. Changes in the hydrological regime were evaluated in relation to seasonal water level regulation. The quantitative and qualitative composition of phytoplankton was analyzed, including the identification of potentially toxic cyanobacterial forms. Based on the collected data, a set of measures was developed to improve fish habitats, stabilize fish resources, and enhance the recreational value of the reservoir. The bioreclamation measures proposed by the authors, taking into account the reduction of the degree of overgrowth of the reservoir to a level that is necessary and reasonable, as well as control over the further development of macrophyte vegetation in it, are aimed at increasing the fish productivity of the water body and expanding the species composition of fish attractive to potential tourists, while simultaneously reducing the abundance of less attractive species. Given the characteristics of the fish habitat and the trophic capacity of the reservoir, as well as the recreational orientation of stocking, the following fish species are recommended for introduction: European catfish (in order to form a self-reproducing stock) and pike (to increase the number of predators).

Keywords: Zelvyanskoye reservoir; Earth remote sensing data; hydrobiological monitoring; tourist and recreational attractiveness.

For citation: Hertman L. N., Adamovich B. V., Davidovich Yu. S., Rudakovskiy I. A., Makarevich O. A., Veres Yu. K. Assessment of a Zelvyanskoye riverine reservoir for its restoration and enhancement of recreational value (Grodno region, Belarus). *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 87–105.

Введение. Взаимодействуя с окружающей природной средой и находясь под постоянным влиянием хозяйственной деятельности, водохранилища постепенно трансформируются и в своем длительном развитии стремятся к выработке такой равновесной природной системы, которая характерна для естественных аквальных ландшафтов данной местности. Этот процесс является длительным во времени и сопровождается изменением природных, а в связи с этим и эксплуатационных характеристик водохранилищ.

Условия развития водохранилищ определяются характером волнения, особенностями водообмена в различных частях акватории, разной степенью воздействия стоковых и циркуляционных течений, формированием специфических гидродинамических зон [1].

Цель работы – дать оценку гидрологическому режиму, гидрохимическим, гидробиологическим, ихтиологическим показателям водохранилища Зельвянское в течение 2024 г. для разработки комплекса мероприятий по оздоровлению среды обитания рыб и повышения рекреационной привлекательности водоема.

Объект и методы исследования. Объектом проведенного исследования является Зельвянское водохранилище. Оно относится к группе малых и небольших неглубоких водохранилищ, отличающихся средними глубинами (от 2 до 3 м), соотношением мелководной и глубоководной части ложа (от 1 до 2 м) и низким показателем удельных затоплений (от 0,35 до 0,50 м). Северо-восточная часть водоема укреплена дамбой длиной 2,67 км, примыкающей к земляной плотине на севере. Площадь поверхности воды водохранилища Зельвянское по проекту составляет 10,37 км². Актуальная длина водохранилища – 9,0 км, ширина: максимальная – 2,0 км, средняя – 1,15 км; глубина максимальная – 7,5 м, средняя – 2,19 м. Объем: полный – 21,65 млн м³, полезный – 12,84 млн м³. Площадь водосбора водохранилища составляет 1273,02 км². Густота речной сети – 29,5 км/км². В водосборном бассейне водохранилища Зельвянское протекает около 400 водотоков и расположено 36 водоемов. Водосборная территория водохранилища расположена в шести административных районах: Волковыском, Зельвенском, Ивацевичском, Пружанском, Свислочском, Слонимском. Более подробные характеристики водохранилища приведены в табл. 1.

Для анализа динамики изменения водной поверхности водохранилища Зельвянское использовались космические снимки спутниковой системы Landsat разных серий: Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI/TIRS. Пространственное разрешение снимков – 30 м.

Радиометрическая и атмосферная коррекция мультиспектральных снимков производилась в программном продукте ENVI 5.6. с помощью инструмента Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH) [2]. Выделение участков открытой водной поверхности производилось в автоматизированном режиме методом максимального правдоподобия [3].

Для определения химического состава и токсикологических характеристик в рамках исследований были использованы данные по отбору проб донных отложений на участках водохранилища Зельвянское, реки Зельвянка, полученные в результате исследований водоема в 2023 г. учеными РУП «ЦНИИКИВР» (руководитель – О. М. Таврыкина). Определяемые в отложениях параметры входят в перечень основных показателей для оценки экологического состояния почв населенных пунктов. Отбор проб воды и донных отложений производился в восьми точках в пределах водохранилища, мощность донных отложений составляла от 8 до 20 см. Анализ проб производился по 25 показателям: БПК₅, содержание нефтепродуктов, взвешенных веществ, минерализация воды, СПАВ (анионоактивные), медь, цинк, свинец, водородный показатель (рН), ХПК Сг, кальций, магний, марганец, фосфор общий, железо общее, калий, натрий, аммоний-ион, нитрат-ион, нитрит-ион, сульфат-ион, хлорид-ион, фосфат-ион, фенолы и азот (по Кьельдалю).

Анализ качества воды в водохранилище проводился в соответствии с работой [4].

Оценка состояния высшей водной растительности водохранилища Зельвянское осуществлялась методом маршрутной съемки в период с 4 по 5 июня 2024 г. Также в указанный период и 8 августа 2024 г. были проведены полевые исследования для отбора интегральных проб (по 0,5 доли с двух горизонтов – верхнего и нижнего) в трех точках водоема (рис. 1): в глубокой северной части, средней части и мелкой южной части. В интегральной пробе было определено содержание общего азота, общего фосфора, взвешенного вещества (сестона), хлорофилла *a* и фитопланктона. В пяти точках водоема (рис. 1) в столбе воды от поверхности через 1 м были измерены содержание кислорода, процент насыщения им воды и температуры воды. В местах массового развития (цветения) водорослей были отобраны пробы и изучено наличие гена синтеза микроцистина – основного токсина цианобактерий. Расположение всех точек было зафиксировано с помощью GPS (см. рис. 1).

Таблица 1. Проектные и актуальные морфометрические характеристики водохранилища Зельвянское и его водосборной территории**Table 1. Design and current morphometric characteristics of the Zelvyanskoye Reservoir and its catchment area**

Показатель	Характеристика	
	проектная	актуальная
Площадь водохранилища, км ²	11,9	10,37
Длина водохранилища, км	9	9
Ширина водохранилища, км:		
средняя	1,32	1,15
максимальная	2	2
Глубина, м:		
средняя	2,62	2,19
максимальная	7,5	7,5
Объем, млн км ³ :		
полный	28	21,65
полезный	17,6	12,84
Длина водораздельной линии, км	156	209,3
Площадь водосбора, км ²	1215,00	1273,02
Длина водосбора, км	54	47,3
Ширина водосбора, км:		
средняя	23	26,9
максимальная	35	39,8
Коэффициент, отн. ед.:		
асимметрии бассейна	0,57	0,49
развития водораздельной линии	1,27	1,654
Густота речной сети, км/км ²	29,5	29,5
Распаханность, %	40	50
Залесенность, %	16	34
Заболоченность, %	15	5

Пробы воды отбирали с помощью двухлитрового батометра Рутнера на нескольких горизонтах. Температуру воды и содержание растворенного кислорода измеряли с помощью оптического оксиметра OrionStar (Thermo Scientific, USA). Насыщение воды кислородом рассчитывали исходя из его концентрации и температуры воды. Прозрачность воды определяли по стандартному белому диску Секки. Содержание взвешенных веществ определяли гравиметрическим методом на мембранных фильтрах с диаметром пор 1 мкм. На этих же фильтрах оценивали содержание хлорофилла *a* без коррекции на присутствие феопигментов спектрофотометрическим методом с экстракцией пигментов в 90%-м ацетоне [5]. Измерение оптической плотности экстракта пигментов проводили на спектрофотометре Cary 50 с использованием приложения Scan, в диапазоне 350–800 нм с шагом 1 нм. Общее содержание азота (TN) определяли с помощью элементного анализатора XPERT-TOC/TN_b (Trace Elemental Instruments, Netherlands), фосфора (TP) – после минерализации нефилтрованной воды с персульфатом калия в кислой среде на водяной бане [6–8].

Фиксацию проб фитопланктона (объемом 0,5 л) проводили раствором Люголя в модификации Т. М. Михеевой [9]. Концентрировали пробы осадочным методом. Плотность (N) и биомассу (B) фитопланктона определяли стандартным счетно-объемным методом. Учет водорослей проводили в камере Фукса – Розенталя. Индивидуальную массу клеток определяли методом геометрического подобия. Формы геометрических тел, которыми аппроксимировали клетки водорослей, и формулы для расчета их объемов приведены в работах [10, 11].

Пробы для молекулярно-биологического анализа отбирали сетью Апштейна и фиксировали 80%-м этанолом. Для выявления цианобактерий, способных к продукции микроцистинов, применяли праймеры, детектирующие последовательность гена, кодирующего домен аминотрансферазы (AMT), входящий в большой кластер микроцистин-синтетазы (mcy) [12]. В качестве контроля использовали ДНК штамма токсичной цианобактерии *Microcystis aeruginosa* CALU 972. Выделение ДНК и амплификацию фрагментов гена AMT-домена проводили по протоколу [13, 14].



Рис. 1. Схема отбора проб воды в водохранилище Зельвянское 4–5 июня и 8 августа 2024 г.

Примечание: желтыми метками обозначены точки отбора проб по всем показателям, красными метками – изучение кислородного и температурного режимов

Fig. 1. Water sampling scheme in the Zelvyanskoye Reservoir on June 4–5 and August 8, 2024.

Note: yellow marks indicate sampling points for all indicators, red marks – the study of oxygen and temperature regimes

Трофический статус оценивали на основании расчета индекса Карлсона [15]. Расчет индекса проводили по трем гидроэкологическим показателям: содержанию в воде хлорофилла *a*, общего фосфора и прозрачности по диску Секки [16].

Индекс трофического состояния (TSI) рассчитывали по каждому из параметров (прозрачности воды, общему фосфору и хлорофиллу *a*) [16]. Статистическую обработку и визуализацию данных проводили в программной среде *R*.

Допустимую рекреационную нагрузку для водохранилища Зельвянское рассчитывали согласно работе [17].

Результаты и их обсуждение. Результаты исследования показали, что площадь водохранилища Зельвянское в настоящее время составляет 9,7 км², что меньше проектной на 13 %. Средняя ширина водохранилища, по сравнению с данными проектных изысканий, сократилась на 0,17 км, средняя глубина уменьшилась на 0,43 м, полный объем снизился на 6,35 млн км³, или на 23 %, полезный объем снизился на 4,76 млн км³, или 27 %. Как видно из рис. 2, площадь водного зеркала почти за 40 лет уменьшилась с 1154,8 до 973,85 га в связи с изменением в регулировании водохранилища и его экологическими последствиями.

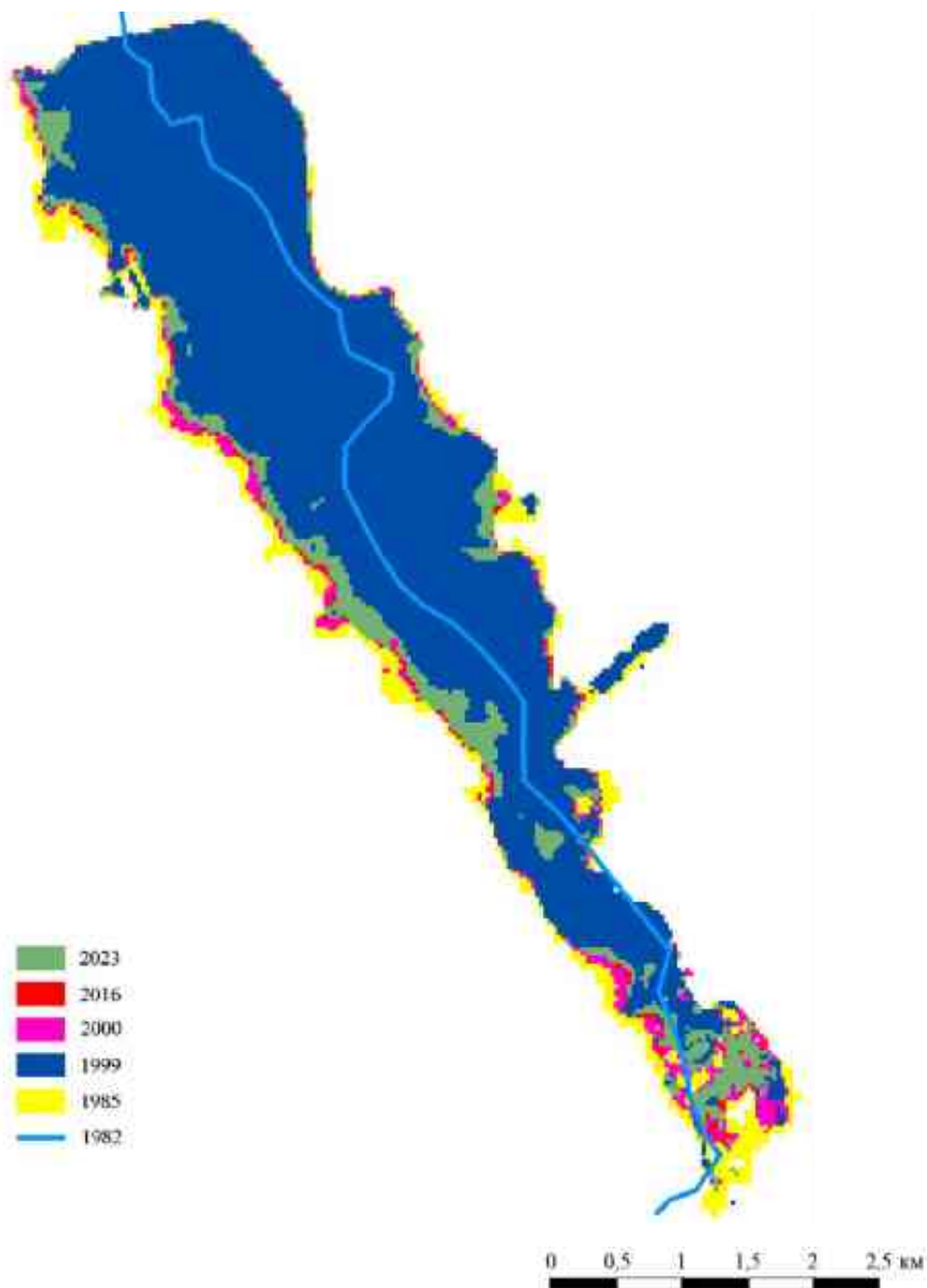


Рис. 2. Изменение площади открытой водной поверхности водохранилища Зельвянское

Fig. 2. Changes in the open water surface area of the Zelvyanskoye Reservoir

Донные отложения отмечаются по всему дну водохранилища со средней мощностью 34 см. Наибольшие мощности – у берегов южной части водоема, в местах сплошного зарастания. В верховьях мощности достигают 42 см. В низовьях мощность донных отложений варьирует от 5 до 10 см. У плотины дно представлено фракцией песков и скоплениями камней. Органический характер донных отложений практически не представлен.

Удельное распределение донных отложений следующее: 13,4 % ложа с наибольшей мощностью 0,35–0,45 м; 25,8 % с мощностью 0,25–0,35 м; 21,4 % с мощностью 0,15–0,25 м; 25,25 % с мощностью 0,05–0,15 м; 14,2 % с мощностью менее 0,05 м.

Анализ качества воды в водохранилище свидетельствует об отсутствии содержания анализируемых элементов, превышающих ПДК. Практически по всем исследуемым веществам их содержание соответствует требованиям [4]. Отмечены превышения биогенных веществ в воде в точках отбора в непосредственной зоне смешивания впадающих в водохранилище реки Мештовка и ручья, непосредственно на берегу которых расположены населенные пункты.

Установленные особенности загрязнения водохранилища Зельвянское позволяют сделать вывод о том, что основным фактором негативных процессов, связанных с явлением «цветения» воды в летний сезон, является антропогенная деятельность в водосборе. Усиленная распашка и внесение удобрений на сельскохозяйственных землях вносят существенный вклад в поступление биогенных веществ, которые при соответствующих погодных условиях вызывают бурный рост фитопланктона. Проводимые водоохранные мероприятия в населенных пунктах, предназначенные для уменьшения поступления биогенных веществ, малоэффективны.

В этой связи хозяйственная деятельность в пределах водосбора водохранилища, и особенно в границах водоохранных зон, должна осуществляться в соответствии с действующим законодательством.

Список растений, произрастающих в водохранилище, представлен в табл. 2. В результате маршрутной съемки водохранилища Зельвянское было выявлено 28 видов водной растительности. Растительный покров водоема определяют макрофиты, относящиеся к таким группам растительных формаций, как погруженные (эугидрофиты) и надводные (аэрогидрофиты) растения, растения с плавающими листьями (плейстогидрофиты), а также околводные (эугидрофиты) и водно-болотные (гигрофеллофиты) растения. Из них 16 видов относятся к ресурсообразующим.

Схема зарастания водохранилища приведена на рис. 3. По характеру зарастания водохранилище относится гидрофитному типу.

Проективное покрытие макрофитами речного (верхнего) района составляет 80–90 %. Макрофиты занимают глубины от 0,0 до 0,8 м.

Водохранилище можно разделить на три гидрографических района (см. рис. 3), в каждом из которых можно условно выделить три зоны: сплошного заболачивания с наличием русловой ложбины; развития сплавин и заболачивания с сохранившимися открытыми участками воды; активного зарастания.

Зона сплошного заболачивания с наличием русловой ложбины. В верхней части водохранилища в зоне заболачивания сформировался участок сплошного зарастания, акватория водохранилища большей частью занята сплавиной, частично свободными остаются речной участок с явно выраженным руслом и небольшие заливы. Сплавины формируют представители как группы гидрофитов (двукосточник тростниковый, аир обыкновенный), так и растения гидрофиты (тростник обыкновенный, рогоз узколистный и широколистный, манник большой). В данной части водохранилища сплавины занимают 70 % общей площади зарастания. Пояс надводной растительности образует сплошные заросли вдоль берегов до глубины 0,3 м. Доминирующими видами являются тростник обыкновенный и рогоз узколистный, образующие сплошные заросли. Рогоз широколистный, аир обыкновенный, манник большой отмечаются единичными экземплярами или небольшими группами (5–10 растений) среди зарослей тростника. Щавельник прибрежный, двукосточник тростниковый, осоки, хвощ речной произрастают вдоль береговой кромки узкой (от 0,5 до 1,0 м) полосой отдельными растениями или группами. Среди других представителей водной флоры вдоль полосы надводных растений в укрытых местах отмечены водокрас обыкновенный и ряска малая. Погруженные в воду растения в этой части русла встречаются по краю и незначительно – в редких зарослях воздушно-водных макрофитов. На сохранившихся участках, не занятых сплавиной и имеющих гидрологическую связь с основным руслом, видовой состав макрофитов более разнообразен. Среди аэрогидрофитов также доминируют тростник обыкновенный и рогоз узколистный, но заметно увеличивается роль в фитоценозе тростника. На отмелях (глубины от 0,1 до 0,2 м) произрастает единичными экземплярами или группами стрелолист стрелолистный, или ежеголовник. Большие площади занимают плейстогидрофиты, среди которых доминирует кубышка желтая. Небольшими группами отмечается кувшинка чисто-белая, водокрас обыкновенный, горец земноводный. Эугидрофиты (уруть колосистая, рдест блестящий и курчавый, штукения гребенчатая, роголистник темно-зеленый) также занимают значительные площади дна, имеют почти сплошной характер распространения. Менее часто в изреженных зарослях погруженных растений в виде единичных растений или фрагментов стеблей может встречаться элодея канадская.

Таблица 2. Список растений, произрастающих в водохранилище Зельвянское и на его водосборной территории**Table 2. List of plants growing in the Zelvyanskoye Reservoir and its catchment area**

Вид растения	Охраняемое	Профилактическая охрана	Ресурсообразующее
ГИДРОФИТЫ			
Эугидрофиты			
1. Уруть колосистая – <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	–	–	+
2. Шелковник волосистый – <i>Ranunculus trichophyllus</i> Chaix	–	–	–
3. Роголистник темно зеленый – <i>Ceratophyllum demersum</i> L.	–	–	–
4. Рдест блестящий – <i>Potamogeton lucens</i> L.	–	–	–
5. Рдест курчавый – <i>Potamogeton crispus</i> L.	–	–	–
6. Рдест пронзеннолистный – <i>Potamogeton perfoliatus</i> L.	–	–	–
7. Штукения гребенчатая – <i>Stuckenia pectinata</i> (L.) Borner [<i>Potamogeton pectinatus</i> L.]	–	–	–
8. Элодея канадская – <i>Elodea canadensis</i> Michx.	–	–	+
9. Харовые водоросли – <i>Charophyceae</i>	–	–	–
10. Каулиния тончайшая – <i>Caulinia tenuissima</i> (A. Braun ex Magnus) Tzvelev	+	–	–
Плейстогидрофиты			
11. Кубышка желтая – <i>Nuphar lutea</i> (L.) Smith	–	–	+
12. Кувшинка чисто-белая – <i>Nymphaea candida</i> J. et C. Presl	–	–	–
13. Ряска малая – <i>Lemna minor</i> L.	–	–	+
14. Водокрас обыкновенный – <i>Hydrocharis morsus-ranae</i> L.	–	–	+
15. Горец земноводный – <i>Persicaria amphibia</i> (L.) Delarbre	–	–	–
Аэрогидрофиты			
16. Рогоз широколистный – <i>Typha latifolia</i> L.	–	–	–
17. Рогоз узколистный – <i>Typha angustifolia</i> L.	–	–	+
18. Манник большой – <i>Glyceria maxima</i> (Hartm.) Holmb	–	–	–
19. Тростник южный, или обыкновенный – <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	–	–	+
20. Камыш озерный – <i>Schoenoplectus lacustris</i> (L.) Palla	–	–	–
21. Осока – <i>Carex</i> sp. p.	–	–	–
22. Стрелолист стрелолистный (мелководная форма) – <i>Sagittaria sagittifolia</i> L.	–	–	–
23. Ежеголовник – <i>Sparganium</i> sp. p.	–	–	–
24. Хвощ речной – <i>Equisetum fluvatile</i> L.	–	–	–
25. Частуха подорожниковая – <i>Alisma plantago-aquatica</i> L.	–	–	–
ГИГРОФИТЫ			
Эугигрофиты			
26. Двукосточник тростниковый – <i>Phalaroides arundinacea</i> (L.) Rausch.	–	–	–
27. Щавельник прибрежный – <i>Rumex hydrolapathum</i> Huds.	–	–	–
Гигрогелофиты			
28. Аир обыкновенный, или болотный (аирный корень) – <i>Acorus calamus</i> L.	–	–	–

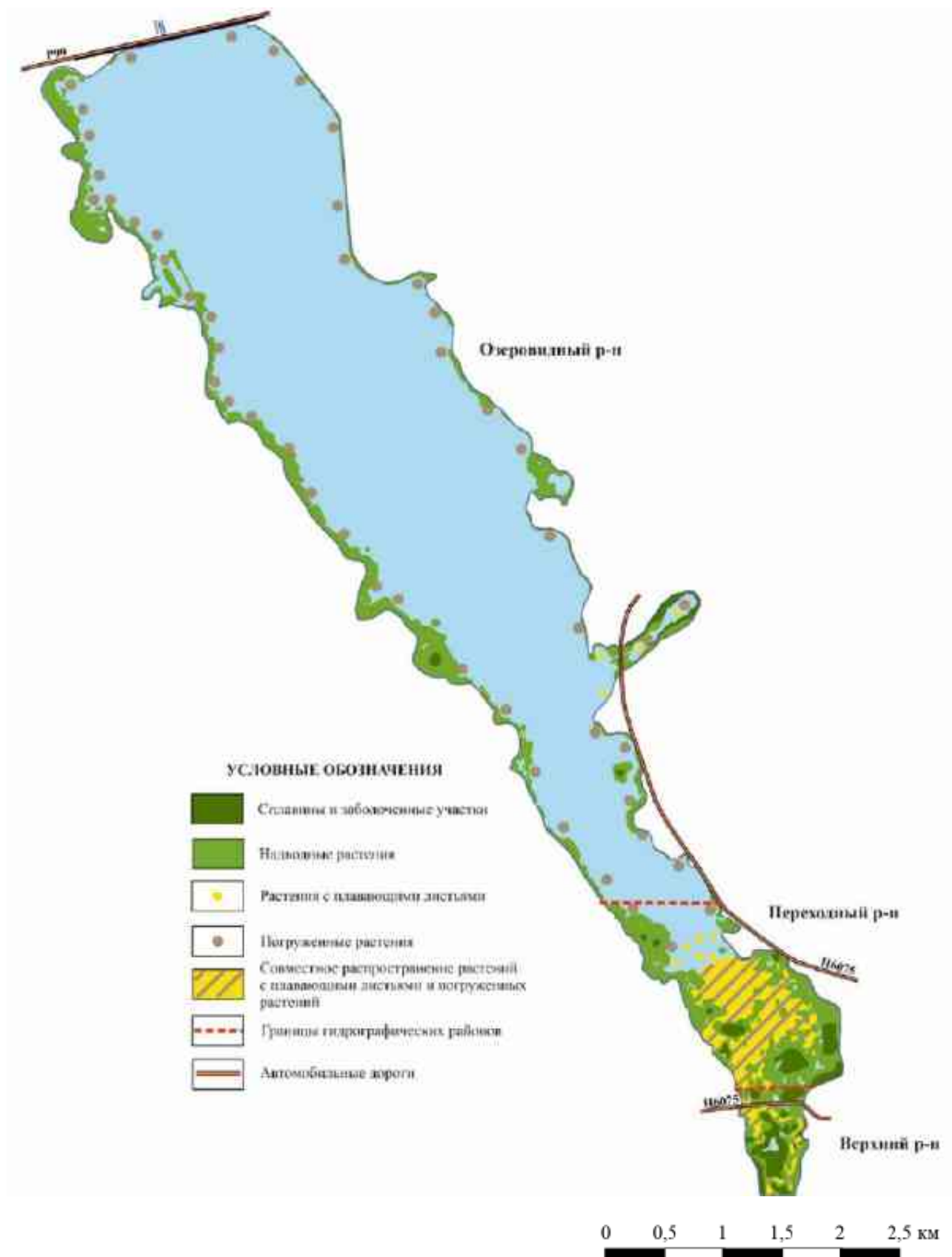


Рис. 3. Схема зарастания водохранилища Зельвянское высшей водной растительностью

Fig. 3. Scheme of overgrowing of the Zelvyanskoye Reservoir with higher aquatic vegetation

В зоне развития сплавин и заболачивания с сохранившимися открытыми участками воды растительный покров определяют гигрофиты и гидрофиты. На долю водно-болотной растительности (гигрофиты) приходится 30 % площади зарастания, на водные растения (гидрофиты) – 70 %. Водная растительность распространена до глубин 0,6 м. В полосе надводных растений основной фон зарастания состоит из рогоза узколистного и тростника обыкновенного. Они образуют как смешанные, так и чистые заросли, причем ближе к границе с третьей зоной, особенно на правом берегу, доля тростника заметно увеличивается. Крайне редко встречаются островки камыша озерного. Растения с плавающими листьями распространены повсеместно (немного меньше в русловой ложбине) на глубинах от 0,4 до 0,6 м. Они произрастают отдельными группами или образуют сплошное покрытие. Здесь значительно чаще (по сравнению с первой зоной) встречается кувшинка чисто-белая, образующая островки в диаметре до 20 м². Горец земноводный отмечен отдельными группами по 10–20 растений. Погруженная растительность произрастает на глубинах от 0,2 до 0,6 м. Имеет мозаичный характер распространения. Доминирующим ее видом является уруть колосистая (до 40 % проективного покрытия), образующая нижний ярус среди растений с плавающими листьями. Рдест блестящий, штукения гребенчатая, роголистник темно-зеленый произрастают отдельными растениями и небольшими группами. Рдест курчавый и рдест пронзеннолистный отмечаются единичными экземплярами.

Зона активного зарастания отличается более высоким видовым разнообразием по сравнению с первыми двумя. Здесь выявлены все виды водной растительности, произрастающие в верхнем гидрографическом районе водохранилища Зельвянское (см. табл. 2). Однако большинство видов встречается в незначительном количестве или единично, и только немногие виды образуют заросли. Вдоль береговой линии и на обширных отмелях отмечается формирование сплавин, растительный покров которых состоит как из водно-болотных растений (двукосточника тростникового, аира обыкновенного, щавельника прибрежный), так и надводных (тростника обыкновенного, двух видов рогоза и манника большого). Надводная растительность представлена чистыми или смешанными зарослями тростника обыкновенного и рогоза узколистного. Они произрастают прерывистой полосой вдоль береговой линии или образуют небольшие острова на акватории водохранилища. Из других представителей аэрогидрофитов отмечены рогоз широколистный, осоки, манник большой, стрелолист стрелолистный (или ежеголовник), хвощ речной. Растения с плавающими листьями распространены по всей акватории зоны, однако распределены крайне неравномерно. Основной фон плейстогидрофитов определяет кубышка желтая, образуя заросли в укрытых заливах. Кувшинка чисто-белая отмечается преимущественно на глубинах от 0,2 до 0,6 м. Она произрастает небольшими островами, площадь которых составляет 5–10 м². Горец земноводный образует небольшие группы, состоящие из 5–8 растений. Вдоль полосы надводных растений в укрытых местах изредка отмечены водокрас обыкновенный и ряска малая. Среди погруженной растительности доминирует уруть колосистая, занимающая глубины от 0,2 до 0,7 м. Вид имеет мозаичный характер распространения, произрастает небольшими куртинами, расположенными на значительном удалении друг от друга. На глубинах от 0,2 до 0,4 м среди урути отмечен роголистник темно-зеленый. Он образует разреженные заросли. Из других представителей эугидрофитов в незначительном количестве выявлены рдест блестящий, рдест курчавый, штукения гребенчатая. Данные виды отмечены единичными экземплярами на глубинах от 0,2 до 0,7 м по всей акватории зоны, кроме русловых участков.

В переходном районе акватории (участок смешанного зарастания) заросли имеют бордюрный (на правом берегу) и мозаичный характер. Здесь прослеживается секторность в расположении фитоценозов. От периферии к центру акватории отмечается следующая схема распространения растительных ассоциаций: осоки, двукосточник тростниковый, хвощ речной, манник большой → тростник обыкновенный, рогоз узколистный, реже – рогоз широколистный → кубышка желтая с вкраплениями кувшинки чисто-белой и иногда – горца земноводного. На близком к зоне сплошного зарастания участке начинают появляться сплавины растительного происхождения, представленные тростниково-рогозовой ассоциацией, а также происходит формирование типичных сплавинных берегов. Эугидрофиты (уруть, рдест блестящий и курчавый, штукения гребенчатая) занимают незначительные площади дна и имеют мозаичный характер распространения. В изреженных зарослях погруженных растений отмечаются небольшими скопления харовые водоросли и единичными растениями роголистник темно-зеленый. Проективное покрытие надводной растительности составляет от 30 до 40 %; растений с плавающими листьями – от 50 до 60; погруженной растительности – от 40 до 50 %.

Для озеровидного района водохранилища характерно различие берегов: правый (по течению) – высокий с подмывными обрывистыми берегами и растущими на них сосновыми лесами; левый – болотистый с растущими ивовыми кустами и ольхой. Основной фон растительного покрова озеровидного участка создают макрофиты из группы аэрогидрофитов. Заросли их здесь повсеместно распространены полосой от 5 до 100 м, и лишь территория у дамбы протяженностью 3 км свободна от зарастания. Среди них доминирующее положение занимает рогоз узколистный с проективным покрытием до 15 %,

обилие по шкале Друде соответствует 5 баллам. Вторым видом, формирующим полосу надводных растений, является тростник обыкновенный полосой от 5 до 50 м. Проективное покрытие тростника составляет около 10 %, обилие по шкале Друде соответствует 4 баллам. Единичными экземплярами отмечаются щавельник прибрежный, рогоз широколистный, хвощ речной, вербейник обыкновенный. Эугидрофиты имеют пятнистый характер распространения и представлены роголистником темно-зеленым и урутью. При этом глубже преобладает уруть, а ближе к зарослям полупогруженных макрофитов становится больше роголистника. Они распространены на глубинах от 0,3 до 0,8 м. Рдест блестящий, рдест курчавый, штукения гребенчатая встречаются редко. Проективное покрытие видов составляет примерно 30 %, обилие по шкале Друде соответствует 3 баллам. Плейстогидрофиты на данном участке водохранилища не обнаружены. За исключением редких находок небольших островков плавающих форм горца земноводного на самом краю зарослей полуводных растений.

Прибрежные участки мелководий левого берега до глубины 0,7 м зарастают жесткой надводной растительностью с образованием сплошной полосы зарастания (шириной от 50 до 100 м). В ассоциациях надводных макрофитов доминирует представитель осоковых – рогоз узколистный, доля которого составляет от 50 до 80 % и представитель семейства злаковых – тростник обыкновенный, доля которого составляет от 20 до 50 %. При этом на левом участке берега от уреза воды часто идет полоса тростника обыкновенного шириной от 5 до 50 м, далее за ним – полоса рогоза узколистного шириной 30–50 м. Единичными экземплярами отмечаются щавельник прибрежный, рогоз широколистный и хвощ речной. Эугидрофиты имеют пятнистый характер распространения и представлены роголистником темно-зеленым и урутью. Они распространены на глубинах от 0,3 до 0,8 м и часто заходят в сами заросли аэрогидрофитов. При этом глубже преобладает уруть, а ближе к зарослям полупогруженных макрофитов становится больше роголистника. Рдест блестящий, рдест курчавый, штукения гребенчатая встречаются редко и единичными растениями.

На правом берегу заросли аэрогидрофитов приобретают прерывистый характер распространения полосой от 10 до 50 м (редко – до 100 м). На высоких песчаных берегах встречаются проходы и небольшие пляжи. В зарослях полупогруженных макрофитов правобережья доминирующее положение занимают тростник обыкновенный и рогоз узколистный. Рогоз узколистный произрастает на правом берегу от уреза воды полосой от 5 до 20 м или небольшими группами среди зарослей тростника. Единичными экземплярами ближе к берегу отмечаются щавельник прибрежный, рогоз широколистный, хвощ речной, вербейник обыкновенный. Эугидрофиты, распространенные здесь еще в большей степени до глубины 0,8 м (фрагментарно – в изреженных тростниковых зарослях и незначительно – по краю надводных макрофитов), представлены в основном урутью, единичными растениями роголистника, рдеста курчавого, штукении гребенчатой.

На участке водохранилища у бетонной дамбы вообще не отмечено ни полупогруженных в воду растений, ни макрофитов с плавающими на поверхности воды листьями. Редко можно встретить негустые участки зарослей или отдельные растения рдеста курчавого, блестящего, пронзеннолистного, штукении гребенчатой, урути, которые уходят на глубину до 0,5 м.

Для озеровидного района водохранилища характерно постепенное обеднение водной растительности по сравнению с верхней его частью и на лицо стадия перерождения экосистемы речного типа к озерному. Также в этой части водохранилища прозрачность по диску Секки становится меньше (в летнее время из-за развития фитопланктона).

По результатам анализа состояния водохранилища Зельвянское можно констатировать, что оно развивается в соответствии с общими закономерностями развития искусственных водоемов и находится на второй стадии развития – окончательное формирование водохранилища, идет отработка отмелей, устойчивое закрепление мелководий высшей водной растительностью.

В начале лета 2024 г. не было отмечено выраженной температурной стратификации водохранилища. Разделение водной массы на эпилимнион (верхний теплый и богатый кислородом слой воды), металимнион (промежуточный слой воды с наибольшим градиентом температур – термоклином – в пределах которого температура резко падает) и гипolimнион (нижний бедный кислородом слой воды в стратифицированных водоемах, залегающий ниже слоя температурного скачка) было условным. На более глубоких станциях 1–3 отмечено несущественное снижение температуры к придонному слою воды. Снижение концентрации кислорода было более существенным, что можно считать признаком стратификации водной массы; однако даже на границе с иловыми отложениями оно составляло более 2 мг/л. На мелководных створах (станции 4–5) отмечено практически полное перемешивание воды, сопровождающееся гомотермией и одинаковой концентрацией кислорода по столбу воды (рис. 4).

Во время обследования 8 августа 2024 г. ситуация несколько изменилась (рис. 5). На станциях 1–3 отмечено существенное снижение концентрации растворенного кислорода от поверхности ко дну. Достигая на поверхности очень высоких величин (более 20 мг/л), содержание кислорода ко дну снижалось практически до 0. В то же время критическое снижение происходило только в нижнем

метровом слое воды. Очевидно, что высокие концентрации кислорода в верхних слоях вызваны фотосинтезом при массовом развитии фитопланктона, в то время как к нижним слоям процессы деградации преобладали над продукцией, и кислород потреблялся гораздо активнее, чем синтезировался в процессе фотосинтеза. На станциях 4 и 5 такого резкого снижения концентрации кислорода ко дну не отмечено, однако содержание кислорода оставалась невысоким по всему столбу воды, снижаясь ко дну до 2,5 мг/л. На всех станциях, кроме станции 5, отмечено некоторое снижение температуры от поверхности ко дну, при этом даже у дна температура не падала ниже 20 °С. На станции 5 в августе отмечена полная гомотермия.

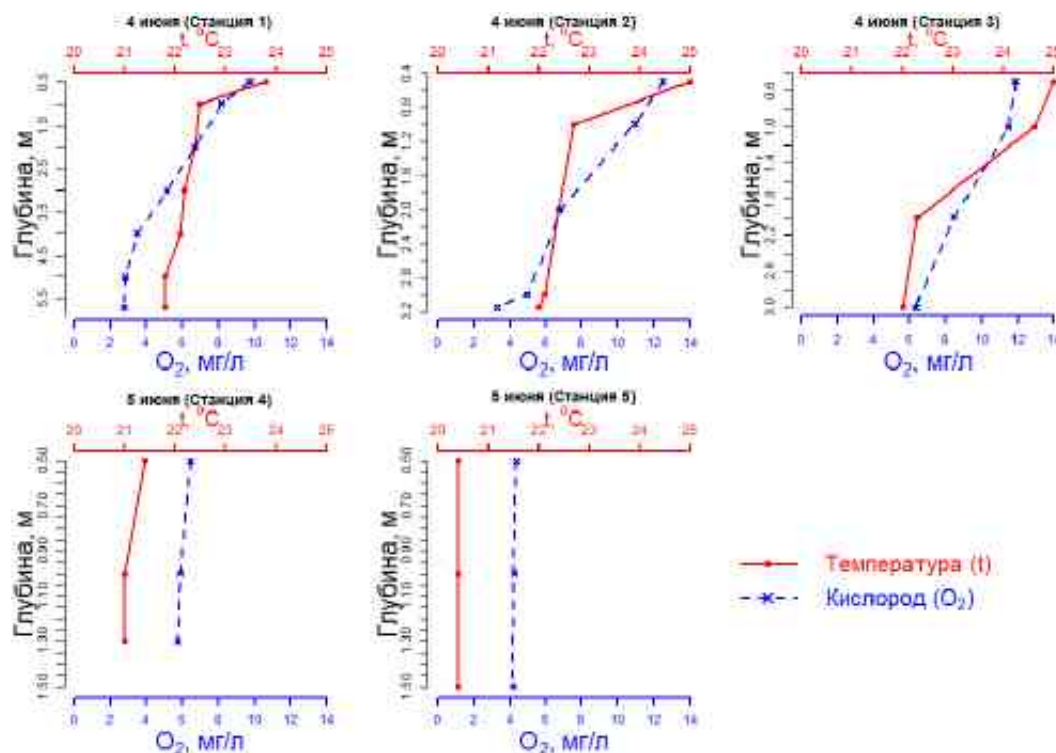


Рис. 4. Вертикальное распределение растворенного кислорода и температуры в столбе воды на водохранилище Зельвянское 4–5 июня 2024 г.

Fig. 4. Vertical distribution of dissolved oxygen and temperature in the water column on the Zelvianskoye Reservoir on June 4–5, 2024

В целом, в отличие от начала лета 2024 г., газовый режим в августе 2024 г. был гораздо более напряженным и полностью контролировался массовым развитием (цветением) фитопланктона. В такой ситуации существует опасность кислородного дефицита и летних заморов, вызванных интенсивным потреблением кислорода фитопланктоном в процессе дыхания в ночной период (когда фитопланктон потребляет кислород, но не производит его в процессе фотосинтеза), а также деградацией большего количества биомассы фитопланктона, требующей больших затрат кислорода при окислении органического вещества.

Основные гидроэкологические показатели, характеризующие продуктивность водохранилища Зельвянское, представлены на рис. 6, из которого видно, что от станции 5 к станции 1 наблюдается существенное увеличение концентраций взвешенного вещества (сестона), общего фосфора и азота, и радикальное увеличение хлорофилла *a*. Прозрачность в то же время заметно снижается. При этом такая же, относительно благоприятная ситуация, наблюдалась на станции 5 в оба периода проведения исследований. На станциях 1 и 3 к августу значительно выросла концентрация общего фосфора, и, как следствие, существенно увеличилась концентрация хлорофилла *a*, снизилась прозрачность.

Следует отметить, что фосфор в подавляющем большинстве водоёмов мира по-прежнему остается основным биогенным элементом, лимитирующим развитие фитопланктона [18].

Из всего этого можно констатировать, что от верховья водохранилища к приплотинной его части наблюдаются существенное увеличение продуктивности и ухудшение экологической ситуации в водохранилище, вызванные увеличением притока фосфора в толщу воды, причем к августу ситуация значительно ухудшается.

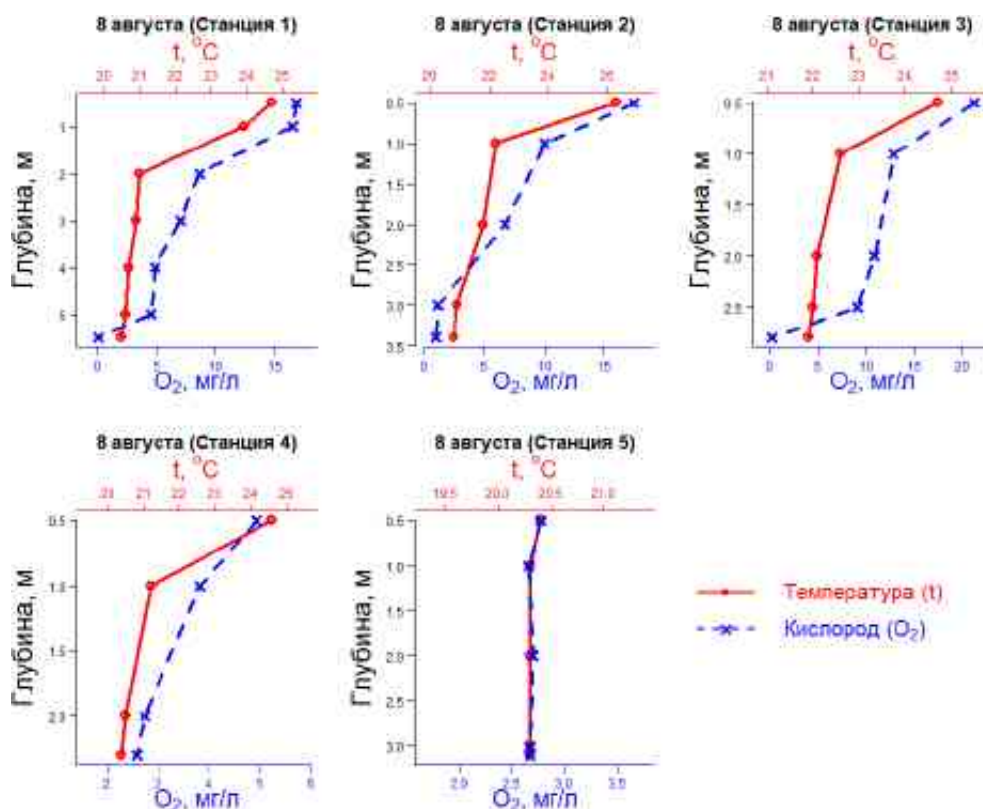


Рис. 5. Вертикальное распределение растворенного кислорода и температуры в столбе воды в водохранилище Зельвянское 8 августа 2024 г.

Fig. 5. Vertical distribution of dissolved oxygen and temperature in the water column in the Zelvyanskoye Reservoir on August 8, 2024

Пространственная и сезонная динамика трофического статуса водохранилища Зельвянское представлена на рис. 7. На нем видно, что в июне 2024 г. станции 1 и 3 находились на границе эвтрофной и высокоэвтрофной зон, а к августу 2024 г. обе станции уже устойчиво находились в высокоэвтрофных условиях. В то же время, трофический статус на станции 5 несколько снизился к августу и находился на границе мезотрофной и эвтрофной зоны. Это еще раз подтверждает вывод о том, что южная часть водохранилища гораздо менее эвтрофирована по сравнению с северной частью. Причиной этому может служить активное развитие в южной части водохранилища высшей водной растительности, которая аккумулирует и задерживает в своей биомассе биогенные элементы, поступающие в воду с территории водосбора и из донных отложений. В целом экологическая ситуация в северной части водохранилища вызывает беспокойство, так как высокотрофные условия могут сопровождаться рядом негативных последствий как для животных, обитающих в водоеме, так и для здоровья человека.

В период проведения исследований на трех станциях изучен фитопланктон водохранилища Зельвянское. Из табл. 3 видно, что уровень развития фитопланктона на станциях 1 и 3 гораздо выше, чем на станции 5. Биомасса фитопланктона на станциях 1 и 3 значительно увеличилась с июня по август 2024 г. Максимальная биомасса в оба периода наблюдения отмечена на станции 3.

На станциях 1 и 3 в оба периода наблюдений отмечено абсолютное доминирование цианобактерий, которые составляли до 99 % всей биомассы фитопланктона. Только на станции 5 в июне 2024 г. доминировали другие группы, а именно динофитовые и зеленые водоросли.

На наиболее эвтрофных станциях 1 и 3 абсолютным доминантом был один вид – *Planktothrix (Oscillatoria) agardhii*, относящийся к нитчатым цианобактериям. На створе 5 представитель динофитовых *Gymnodinium* Stein. *Planktothrix (Oscillatoria) agardhii*, преобладавший на створах 1 и 3 в течение сезона и относящийся к потенциально токсичным видам цианобактерий [19]. Однако в период исследований не зарегистрировано наличие генов синтеза микроцистина в водохранилище. Имеющие место летние заморные явления с большой долей вероятности вызваны дефицитом кислорода в утренние часы при интенсивном потреблении кислорода фитопланктоном в процессе дыхания, а также деструкцией большого количества биомассы фитопланктона.

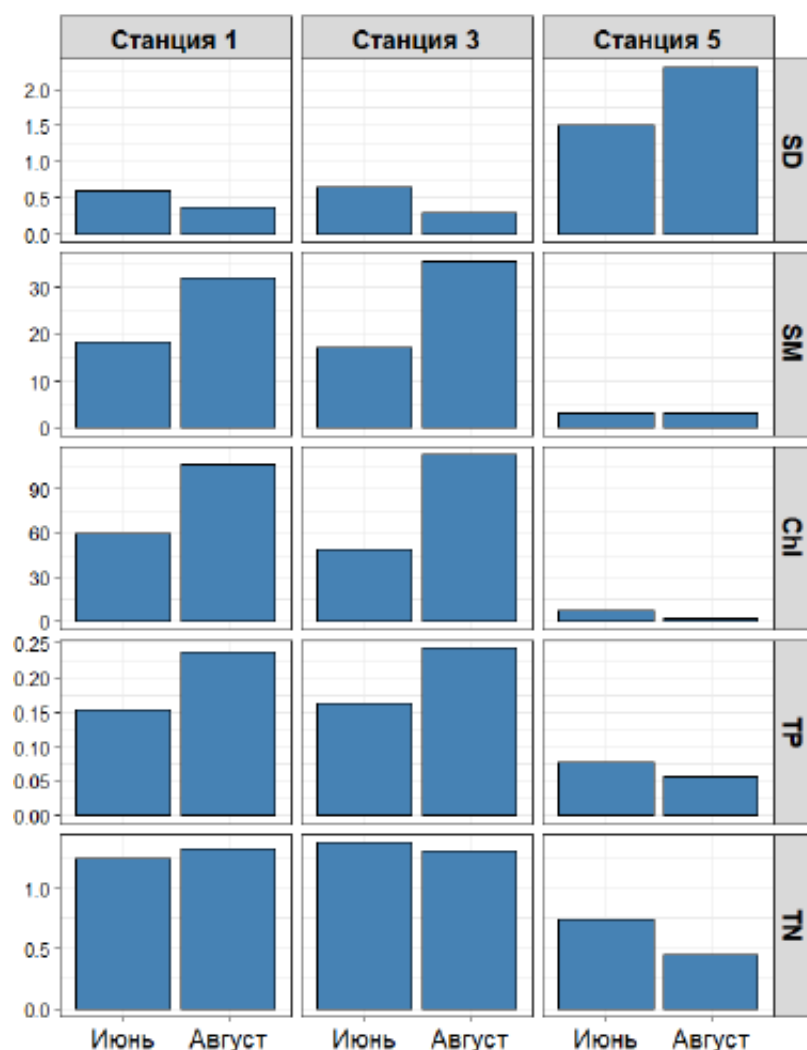


Рис. 6. Основные гидроэкологические показатели водохранилища Зельвянское в 2024 г:
SD – прозрачность по диску Секки, м; SM – содержание в воде взвешенного вещества, мг/л;
Chl – содержание в воде хлорофилла а, мкг/л; TP – содержание в воде общего фосфора, мг/л;
TN – содержание в воде общего азота, мг/л

Fig. 6. Main hydroecological indicators of Zelvyanskoye reservoir in 2024:
SD – Secchi disk transparency, m; SM – suspended matter content in water, mg/l;
Chl – chlorophyll a content in water, µg/l; TP – total phosphorus content in water, mg/l;
TN – total nitrogen content in water, mg/l

В настоящее время согласно данным Государственного водного кадастра на водохранилище Зельвянское оборудован только один пляж – городской пляж г. п. Зельва, ул. Шоссейная (53.142570, 24.823440). По результатам измерений качества воды по санитарно-гигиеническим показателям для целей рекреации за последние 4 года превышений предельно допустимых значений не установлено. Следовательно, данный водоем может быть использован для различных видов рекреации, включая контактные виды (например, плавание).

Наибольший интерес в настоящее время водохранилище Зельвянское представляет для любительского рыболовства. В этой связи организация рекреации и туризма может быть подчинена именно данной группе отдыхающих.

Наиболее приемлемым для организации оборудованной сети туристических стоянок для отдыха в естественных природных условиях является восточный берег водохранилища, занятый лесными массивами Государственного лесохозяйственного учреждения «Слонимский лесхоз» (Зельвенское лесничество, кварталы 91, 108, 114, 116). Береговая линия водохранилища на данном участке представлена обрывистыми абразионными и низкими песчаными берегами.

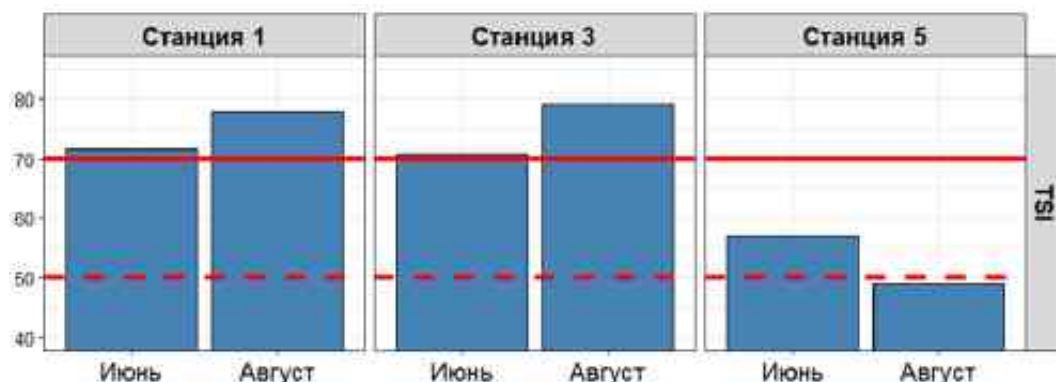


Рис. 7. Индекс трофического состояния (TSI) водохранилища Зельвянское 4–5 июня и 8 августа 2024 г.

Примечание: штриховой линией обозначена условная граница мезотрофной и эвтрофной зон, сплошной линией – эвтрофной и высокоэвтрофной зон

Fig. 7. Trophic state index (TSI) in the Zelvyanskoye Reservoir on June 4–5 and August 8, 2024.

Note: the dashed line indicates the conditional boundary of the mesotrophic and eutrophic zones, the solid line – the eutrophic and highly eutrophic zones

Таблица 3. Количественные характеристики развития фитопланктона в водохранилище Зельвянское

Table 3. Quantitative characteristics of phytoplankton development in the Zelvyanskoye Reservoir

Дата	Станция	Численность фитопланктона		Биомасса фитопланктона, мг/л
		млн организмов /л	млн клеток /л	
05.06.2024	1	19,17	703,61	38,55
05.06.2024	3	24,48	974,88	50,07
04.06.2024	5	3,56	9,89	1,33
08.08.2024	1	39,90	1533,30	81,02
08.08.2024	3	57,27	2604,75	131,72
08.08.2024	5	1,38	16,22	0,95

Создание сети туристических стоянок направлено на:

- 1) снижение антропогенной нагрузки на экосистемы и рациональное ее перераспределение в соответствии с состоянием и пропускной возможностью экосистем;
- 2) регулирование посещаемости природных комплексов туристами;
- 3) обеспечение удовлетворения спроса населения на туристическое обслуживание и сохранение природных комплексов путем организации платных туристических стоянок.

Возможно несколько типов туристических стоянок:

- 1) общего типа – туристическая стоянка без предварительного бронирования и оплаты на месте за размещение на ее территории;
- 2) заказного типа – туристическая стоянка с возможностью предварительного бронирования и предварительной оплаты за размещение на ее территории.

Ориентировочно местоположение туристических стоянок представлены на рис. 8.

Как дополнительное обустройство стоянок предлагается создание стационарных или наплавных мостков, для более удобного причаливания маломерных судов или любительского лова рыбы. Также на акватории водохранилища возможна установка плотов для любительского лова рыбы.

Функционирование и обслуживание туристических стоянок обеспечиваются землепользователем или арендаторами. Они проводят работы по подготовке к сезону массового летнего отдыха, поддерживают надлежащий порядок в течение всего туристического сезона, осуществляют поставку дров на туристические стоянки заказного типа, обслуживание туалетов, вывоз мусора, размещение необходимой информации, производят контроль за санитарным состоянием туристических стоянок и прилегающей территории.



Рис 8. Ориентировочное местоположение туристических стоянок

Fig. 8. Approximate location of tourist camps

Для увеличения экономических выгод от развития туризма на территории района необходимо:

1) увеличивать число посетителей. При этом рост посещаемости допустим только до тех пор, пока доходы от привлечения туристов превышают расходы по организации туризма. Увеличение числа посетителей при определенных условиях может усилить негативный экологический эффект. Туризм на охраняемых территориях должен осуществляться с учетом нормативов антропогенной нагрузки и не допускать нарушений состояния экосистем;

2) увеличивать среднюю продолжительность пребывания: длительное пребывание туриста на территории создает больше возможностей для реализации местной продукции и услуг;

3) привлекать, используя различные рыночные механизмы, потребителей с высокой покупательной способностью;

4) повышать продажи для каждого посетителя: чем больше предлагается к реализации местной продукции, доступной посетителям как непосредственно, так и опосредованно, тем выше расходы туристов и доходы местных жителей;

5) обеспечивать возможность ночлега на месте, что также повышает расходы туристов на питание и приобретение различных товаров и услуг;

6) осуществлять экскурсионное обслуживание, предоставлять другие виды дополнительных услуг;

7) организовывать интересные события: выставки художников и ремесленников, а также фестивали, основанные на культурных традициях, способствующие росту рекреационной привлекательности территории;

8) осуществлять продажу местной еды и напитков в целях обеспечения популяризации и развития местных кулинарных традиций, а также получения существенного дохода местными фермерами.

Основная задача предлагаемых биомелиоративных мероприятий – на фоне снижения степени зарастания водохранилища Зельвянского до пределов необходимой целесообразности и контроля дальнейшего развития в нем макрофитной растительности достичь повышения рыбопродуктивности

водохранилища и расширить видовой состав рыб, привлекательных для рыболовов-любителей, с одновременным уменьшением численности мелкой «сорной» рыбы.

С учетом характеристики среды обитания рыб и кормовой емкости водохранилища Зельвянское, а также принимая во внимание рекреационную направленность зарыбления, в качестве объектов для вселения рекомендуются такие виды рыб, как сом европейский (с целью формирования самовоспроизводящегося стада) и некоторое количество щуки (для увеличения численности хищников).

Заключение. По результатам анализа состояния водохранилища Зельвянское можно констатировать, что оно развивается в соответствии с общими закономерностями развития искусственных водоемов и находится на второй стадии – окончательного формирования водохранилища, идет отработка отмелей, происходит устойчивое закрепление мелководий высшей водной растительностью. Уровненный режим в водохранилище регулируется на водосбросе гидроузла и во многом зависит от сезонных внутригодовых явлений.

Содержание анализируемых химических веществ в донных отложениях не превышает пороговые значения загрязняющих веществ в донных отложениях поверхностных водных объектов, установленных в работе [20]. Отмечены превышения содержания биогенных веществ в точках отбора в воде в непосредственной зоне смешивания впадающих в водохранилище реки Мештовка и ручья, непосредственно на берегу которых расположены населенные пункты. Установленные особенности загрязнения водохранилища Зельвянское позволяют сделать вывод о том, что основными факторами негативных процессов, связанных с явлением «цветения» воды в летний сезон, являются результатом антропогенной деятельности на водосборе. Усиленная распашка и внесение удобрений на сельхозугодьях вносят существенный вклад в поступление биогенных веществ, при соответствующих погодных условиях вызывающих бурный рост фитопланктона. Проводимые водоохранные мероприятия в населенных пунктах, предназначенные для уменьшения поступления биогенных веществ, малоэффективны. Гидроэкологическую ситуацию на водохранилище Зельвянское можно охарактеризовать как благоприятную.

Характер растительного покрова водоема определяют макрофиты, относящиеся к таким группам растительных формаций, как околотовые (эугигрофиты), водно-болотные (гигрогелофиты), надводные растения (аэрогидрофиты), растения с плавающими листьями (плейстогидрофиты) и погруженные растения (эугидрофиты). Из них 16 видов относятся к ресурсообразующим. По характеру зарастания водохранилища можно отнести гидрофитному типу.

Для озеровидного района водохранилища характерно постепенное обеднение водной растительности по сравнению с верхней его частью и налицо стадия перерождения экосистемы речного типа к озерному. Также в этой части водохранилища прозрачность по диску Секки становится меньше (в летнее время из-за развития фитопланктона).

В изученном водоеме не отмечено выраженной стратификации и разделение водной массы на эпи- и металимнион является условным. Содержание кислорода сохраняется относительно благоприятным практически по всему столбу воды. При этом на более глубоких станциях 1–3 отмечено незначительное снижение температуры к придонному слою воды. Снижение концентрации кислорода было более существенным, что можно считать признаком стратификации водной массы, однако даже на границе с иловыми отложениями оно составляло более 2 мг/л. На мелководных створах 4–5 отмечено практически полное перемешивание воды, сопровождающееся гомотермией и одинаковой концентрацией кислорода по столбу воды.

От верховья к приплотинной части наблюдается существенное увеличение продуктивности и ухудшение экологического состояния в водохранилище, вызванное увеличением притока фосфора в толщу воды, причем к августу ситуация значительно ухудшается.

Южная часть водохранилища гораздо менее эвтрофирована по сравнению с северной частью. Причиной этому может служить активное развитие в южной части водохранилища высшей водной растительности, которая аккумулирует и задерживает в своей биомассе биогенные элементы, поступающие в воду с территории водосбора и из донных отложений.

В период исследований не зарегистрировано наличие генов синтеза микроцистина в водохранилище. Имеющие место летние заморные явления с большой долей вероятности вызваны дефицитом кислорода в утренние часы при интенсивном потреблении кислорода фитопланктоном в процессе дыхания, а также деструкцией большого количества биомассы фитопланктона.

Водоем имеет достаточно большую рекреационную емкость, что позволяет развивать здесь различные виды рекреации. В настоящее время водохранилище представляет наибольший интерес для любительского рыболовства. В этой связи организация рекреации и туризма может быть подчинена именно данной группе отдыхающих. Наиболее приемлемым для организации оборудованной сети туристических стоянок для отдыха в естественных природных условиях является восточный берег водохранилища, занятый лесными массивами государственного лесохозяйственного учреждения «Слонимский лесхоз» (Зельвенское лесничество, кварталы 91, 108, 114, 116). Береговая линия водохранилища на данном участке представлена обрывистыми абразионными и низкими песчаными

берегами. Кроме организации мест размещения рекреантов непосредственно на берегу водохранилища Зельвянское, для расширения возможности принятия отдыхающих требуется развитие инфраструктуры в целом в регионе.

Благодарность. Работа выполнена в рамках выполнения 2-го этапа научно-исследовательской работы «Исследование водохранилища Зельвянское с целью его восстановления и оздоровления среды обитания рыб и стабилизации ресурсов ихтиофауны» (ГР № 20241046).

Acknowledgement. The work was carried out as part of the 2-nd stage of the research project “Study of the Zelyvanskoye Reservoir in order to restore and improve the fish habitat and stabilize the ichthyofauna resources” (GR No. 20241046).

Список использованных источников

1. Давидович, Ю. С. Оценка изменения водной поверхности Зельвянского водохранилища по данным дистанционного зондирования Земли / Ю. С. Давидович, Л. Н. Гертман // Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии : материалы VII Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию каф. геогр. экологии Белорус. гос. ун-та, Минск, 11–15 нояб. 2024 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: А. Н. Витченко (гл. ред.) [и др.]. – М. : БГУ, 2024. – С. 93–96.
2. Топаз, А. А. Радиометрическая и атмосферная коррекция космических снимков в программном комплексе ENVI : учеб.-метод. рекомендации по курсу «Цифровая обработка космических снимков» для студентов специальностей 1-31 02 03 «Космоаэрокартография», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)» / А. А. Топаз, Ю. С. Давидович. – Мн. : БГУ, 2022. – 28 с.
3. Лурье, И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков : учебник / И. К. Лурье. – М. : КДУ, 2010. – 424 с.
4. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Нормативы качества воды поверхностных водных объектов : ЭкоНП 17.06.01-006-2023. – Введ. 26.04.2024. – Мн. : Мин-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 2023. – 21 с.
5. Kovalevskaya, R. Z. Modification of the method of spectrophotometric determination of chlorophyll a in the suspended matter of water bodies / R. Z. Kovalevskaya, H. A. Zhukava, B. V. Adamovich // Journal of Applied Spectroscopy. – 2020. – Vol. 87, № 1. – P. 72–78. – DOI: 10.1007/s10812-020-00965-9.
6. Унифицированные методы анализа вод / под общ. ред. Ю. Ю. Лурье. – М. : Химия, 1973. – 376 с.
7. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Т. С. Кишкинова, В. Т. Каплин, А. Г. Страдомская [и др.]. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 541 с.
8. Wetzel, R. G. Limnological analysis / R. G. Wetzel, G. E. Likens. – N. Y. : Springer-Verlag, 2000. – 429 p.
9. Михеева, Т. М. Методы количественного учета нанопланктона (обзор) / Т. М. Михеева // Гидробиологический журнал. – 1989. – Т. 25, № 4. – С. 3–21.
10. Михеева, Т. М. Альгофлора Беларуси. Таксономический каталог / Т. М. Михеева. – Мн. : Изд-во БГУ, 1999. – 396 с.
11. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae / H. Hillebrand, C.-D. Dürselen, D. Kirschtel [et al.] // Journal of Phycology. – 1999. – № 35. – P. 403–424. – DOI: 10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x.
12. Jungblut, A.-D. Molecular identification and evolution of the cyclic peptide hepatotoxins, microcystin and nodularin, synthetase genes in three orders of cyanobacteria / A.-D. Jungblut, A. B. Neilan // Archives of Microbiology. – 2006. – № 185. – P. 107–114. – DOI: 10.1007/s00203-005-0073-5.
13. Presence and genetic diversity of microcystin-producing cyanobacteria (Anabaena and Microcystis) in Lake Kotokel (Russia, Lake Baikal Region) / O. I. Belykh, E. G. Sorokovikova, G. A. Fedorova [et al.] // Hydrobiologia. – 2011. – № 671. – P. 241–252. – DOI: 10.1007/s10750-011-0724-2.
14. Phytoplankton of the transboundary River Viliya (Neris): community structure and toxic cyanobacterial blooms / B. Adamovich, T. Mikheeva, E. Sorokovikova [et al.] // Baltica. – 2021. – Vol. 34, № 2. – P. 174–184. – DOI: 10.5200/baltica.2021.2.4.
15. Carlson, R. E. A trophic state index for lakes / R. E. Carlson // Limnol. Oceanogr. – 1977. – Vol. 11. – P. 361–369. – DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
16. Long-term variations of the trophic state index in the Narochanskie lakes and its relation with the major hydroecological parameters / B. V. Adamovich, T. V. Zhukova, T. M. Mikheeva [et al.] // Water Resources. – 2016. – Vol. 43, № 5. – P. 809–817. – DOI: 10.1134/S009780781605002X.
17. Требования по содержанию поверхностных водных объектов в надлежащем состоянии и их благоустройству : ЭкоНП 17.06.08-003-2022. – Введ. 11.03.2022. – Мн. : Мин-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 2022. – 40 с.
18. Relationships of total phosphorus and chlorophyll in lakes worldwide / R. Quinlan, A. Filazzola, O. Mahdian [et al.] // Limnol. Oceanogr. – 2021. – № 66. – P. 392–404. – DOI: 10.1002/lno.11611.
19. Meriluoto, J. Handbook on cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis / J. Meriluoto, L. Spoof, G. A. Codd. – N. Y. : Wiley, 2017. – 576 p.
20. Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности : ЭкоНП 17.01.06-001-2017. – Введ. 18.07.2017. – Мн. : Мин-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 2017. – 185 с.

References

- Davidovich Yu. S., Gertman L. N. *Ocenka izmeneniya vodnoj poverxnosti Zel'vyanskogo vodoxranilishha po dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli* [Assessment of changes in the water surface of the Zelvyanskoye Reservoir based on remote sensing data]. *Sovremennyye problemy landshaftovedeniya i geokologii: materialy VII Mezhdunar. nauch. konf., posvyashh. 90-letiyu kaf. geogr. e'kologii Belorus. gos. un-ta, Minsk, 11–15 noyab. 2024 g.* [Modern problems of landscape science and geocology: Proc. of the VII Intern. scientific conference dedicated to the 90th anniversary of the Department of Geogr. Ecology of the Belarusian State University, Minsk, 11–15 November 2024.]. Minsk, 2024, pp. 93–96. (in Russian)
- Topaz A. A., Davidovich Yu. S. *Radiometricheskaya i atmosfernaya korrekciya kosmicheskix snimkov v program-mnom komplekse ENVI: ucheb.-metod. rekomendacii po kursu «Cifrovaya obrabotka kosmicheskix snimkov» dlya studentov special'nostej 1-31 02 03 «Kosmoaerokartografiya», 1-56 02 02 «Geoinformacionnyye sistemy» (po napravleniyam)* [Radiometric and atmospheric correction of space images in the ENVI software package: training and methodological recommendations for the course "Digital processing of space images" for students of specialties 1-31 02 03 "Space and aeronautical cartography", 1-56 02 02 "Geoinformation systems (by direction)"]. Minsk, BSU Publ., 2022, 28 p. (in Russian)
- Lurye I. K. *Geoinformacionnoe kartografirovanie. Metody geoinformatiki i cifrovoj obrabotki kosmicheskix snimkov: Geoinformatsionnoye kartografirovanie. Metody geoinformatiki i cifrovoj obrabotki kosmicheskix snimkov: tekhnicheskoe posobie* [Geoinformation mapping. Methods of geoinformatics and digital processing of space images: textbook]. Moscow, KDU Publ., 2010, 424 p. (in Russian)
- EcoNiP 17.06.01-006-2023. *Oxrana okruzhayushhej sredy i prirodopol'zovanie. Gidrosfera. Normativy kachestva vody poverxnostnyx vodnyx ob'ektov* [EcoNiP 17.06.01-006-2023. Environmental protection and Nature Management. Hydrosphere. Water quality standards for surface water bodies]. Minsk, Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 2023, 21 p. (in Russian)
- Kovalevskaya R. Z., Zhukava H. A., Adamovich B. V. Modification of the method of spectrophotometric determination of chlorophyll a in the suspended matter of water bodies. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2020, vol. 87, no 1, pp. 72–78. DOI: 10.1007/s10812-020-00965-9.
- Lurye Yu. Yu. *Unificirovannyye metody analiza vod* [Unified methods of water analysis]. Moscow, Chemistry Publ., 1973, 376 p. (in Russian)
- Kishkinova T. S., Kaplin V. T., Stradomskaya A. G. *Rukovodstvo po ximicheskomu analizu poverxnostnyx vod sushi* [Manual of chemical analysis of terrestrial surface waters]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1977, 541 p. (in Russian)
- Wetzel R.G., Likens G. E. *Limnological analysis*. New York, Springer-Verlag Publ., 2000, 429 p.
- Miheeva T. M. *Metody kolichestvennogo ucheta nanofitoplanktona (obzor)* [Methods for quantitative accounting of nanophytoplankton (review)]. *Gidrobiologicheskij zhurnal = Hydrobiological Journal*, 1989, vol. 25, no. 4, pp. 3–21. (in Russian)
- Miheeva T. M. *Al'goflora Belarusi. Taksonomicheskij katalog* [Algal flora of Belarus. Taxonomic catalog]. Minsk, BSU Publ., 1999, 396 p. (in Russian)
- Hillebrand H., Dürselen C.-D., Kirschtel D., Pollinger U., Zohary T. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 1999, no. 35, pp. 403–424. DOI: 10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x.
- Jungblut A.-D., Neilan A. B. Molecular identification and evolution of the cyclic peptide hepatotoxins, microcystin and nodularin, synthetase genes in three orders of cyanobacteria. *Archives of Microbiology*, 2006, no. 185, pp. 107–114. DOI: 10.1007/s00203-005-0073-5.
- Belykh O. I., Sorokovikova E. G., Fedorova G. A., Kaluzhnaya O. V., Korneva E. S., Sakirko M. V., Sherbakova T. A. Presence and genetic diversity of microcystin-producing cyanobacteria (Anabaena and Microcystis) in Lake Kotokel (Russia, Lake Baikal Region). *Hydrobiologia*, 2011, no. 671, pp. 241–252. DOI: 10.1007/s10750-011-0724-2.
- Adamovich B., Mikheeva T., Sorokovikova E., Belykh O., Paškauskas R., Kuzmin A., Fedorova G., Zhukava H., Karosienė J. Phytoplankton of the transboundary River Viliya (Neris): community structure and toxic cyanobacterial blooms. *Baltica*, 2021, vol. 34, no. 2, pp. 174–184. DOI: 10.5200/baltica.2021.2.4.
- Carlson R. E. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanog.*, 1977, vol. 11, pp. 361–369. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
- Adamovich B. V., Zhukova T. V., Mikheeva T. M., Kovalevskaya R. Z., Luk'yanova E. V. Long-term variations of the trophic state index in the Narochanskies Lakes and its relation with the major hydroecological parameters. *Water Resources*, 2016., vol. 43, no. 5., pp. 809–817. DOI: 10.1134/S009780781605002X.
- EcoNiP 17.06.08-003-2022. *Trebovaniya po sodержaniyu poverxnostnyx vodnyx ob'ektov v nadlezhashhem sostoyanii i ix blagoustrojstvu* [EcoNiP 17.06.08-003-2022. Requirements for the maintenance of surface water bodies in proper condition and their improvement]. Minsk, Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 2022, 40 p. (in Russian)
- Quinlan R., Filazzola A., Mahdian O., Shuvo A., Blagrove K., Ewins C., Moslenko L., Gray D. K., O'Reilly C. M., Sharma S. Relationships of total phosphorus and chlorophyll in lakes worldwide. *Limnol. Oceanog.*, 2021, no. 66, pp. 392–404. DOI: 10.1002/lno.11611.
- Meriluoto J., Spoof L., Codd G. A. *Handbook on cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis*. New York, Wiley Publ., 2017, 576 p.
- EcoNiP 17.01.06-001-2017. *Oxrana okruzhayushhej sredy i prirodopol'zovanie. Trebovaniya e'kologicheskoy bezopasnosti* [EcoNiP 17.01.06-001-2017. 27. Environmental Protection and Nature Management. Environmental Safety Requirements]. Minsk, Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 2017, 185 p. (in Russian)

Информация об авторах

Гертман Любовь Николаевна – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: lubov.hertman@yandex.by

Адамович Борис Владиславович – кандидат биологических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией гидроэкологии биологического факультета Белорусского государственного университета (ул. Курчатова, 10, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: belaqualab@gmail.com

Давидович Юрий Сергеевич – аспирант кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: seg98001@gmail.com

Рудаковский Игорь Алексеевич – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: rudakovski@bsu.by

Макаревич Олег Анатольевич – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории гидроэкологии биологического факультета Белорусского государственного университета (ул. Курчатова, 10, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: oleg_mak69@mail.ru

Верес Юлия Константиновна – кандидат биологических наук, начальник Нарочанской биологической станции им. Г. Г. Винберга» Белорусского государственного университета (ул. Набережная, 8, 222395б, к. п. Нарочь, Беларусь). E-mail: veres.julia.naroch@gmail.com

Information about the authors

Lubov N. Hertman – Senior Researcher of the Landscape Ecology Research Laboratory of the Faculty of Geography and Geoinformatics of the Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: lubov.hertman@yandex.ru

Boris V. Adamovich – Ph. D. (Biology), Head of Research Laboratory of Aquatic Ecology of the Faculty of Biology of the Belarusian State University (Kurchatov St., 10, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: belaqualab@gmail.com

Yury S. Davidovich – Postgraduate student of the Department of Soil Science and Geoinformatic, Junior Research Assistant of the Landscape Ecology Research Laboratory of the Faculty of Geography and Geoinformatics of the Belarusian State University (16, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: seg98001@gmail.com

Igor A. Rudakovsky – Senior Researcher of the Landscape Ecology Research Laboratory of the Faculty of Geography and Geoinformatics of the Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: rudakovski@bsu.by

Oleg A. Makarevich – Senior Researcher of the Research Laboratory of Aquatic Ecology of the Faculty of Biology of the Belarusian State University (10, Kurchatov St., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: oleg_mak69@mail.ru

Yulia K. Veres – Ph. D. (Biology), Head of the G. G. Vinberg Naroch Biological Station of the Belarusian State University (8, Naberezhnaya St., 222395b, Naroch, Belarus). E-mail: veres.julia.naroch@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОСТУПЛЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД В СЕТИ КАНАЛИЗАЦИИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ БЕЛАРУСИ

С. А. Дубенок¹, А. И. Денищик²

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь;

²Республиканское унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрены условия формирования сточных вод, поступающих в систему канализации населенного пункта, в разрезе основных источников их поступления: сточные воды от населения, сточные воды от предприятий и организаций, дополнительный приток. Подробно проанализированы структура и условия формирования различных категорий сточных вод, факторы и особенности их поступления в систему канализации населенного пункта. Дополнительный приток вод в данную систему классифицирован на организованный и неорганизованный. На основании данных статистической отчетности 1-вода (Минприроды) «Отчет об использовании вод» за период 2020–2024 гг. проведена оценка объемов поступления дополнительного притока вод в сети канализации населенных пунктов и его влияние на эффективность работы коммунальных очистных сооружений. Установлено, что объем дополнительного притока вод в рассматриваемых населенных пунктах варьируется от 0,82 до 49,66 %. В то же время в разрезе населенных пунктов по эквиваленту населения среднее доленое значение годового объема дополнительного притока по группам варьируется в диапазоне от 20,97 до 24,54 %, что является достаточно большой величиной и свидетельствует о значительной доле дополнительного притока вод, поступающих в систему канализации населенного пункта и на очистные сооружения. Факторный анализ не выявил прямой функциональной зависимости между величиной дополнительного притока вод и эквивалентной мощностью очистных сооружений, а также годовыми объемами выпавших осадков, что свидетельствует о преобладании в объеме дополнительного притока вод именно организованного дополнительного притока, обусловленного несовершенством системы учета отдельных категорий сточных вод, поступающих в систему канализации населенного пункта.

Ключевые слова: система канализации; сточная вода; дополнительный приток; учет сточных вод; инфильтрация.

Для цитирования. Дубенок С. А., Денщик А. И. Особенности формирования и поступления сточных вод в сети канализации населенных пунктов Беларуси // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 106–119.

SPECIFIC FEATURES OF WASTEWATER FORMATION AND INFLOW INTO MUNICIPAL SEWERAGE SYSTEMS IN BELARUS

S. A. Dubianok¹, A. I. Denisichik²

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus;

²Republican unitary enterprise “Central research institute
for complex use of water resources”, Minsk, Belarus

Abstract. The paper examines the conditions of wastewater formation entering the municipal sewerage system, categorized by main sources of inflow: domestic wastewater from the population, wastewater from enterprises and organizations, and additional inflow (infiltration). The structure and formation conditions of various wastewater categories are analyzed in detail, along with factors and specific features of their entry into sewer networks. Additional water inflow into this system is classified as organized and unorganized. Based on data from the 1-voda statistical report (Ministry of Natural Resources) “Report on Water Use” for the period 2020–2024, an assessment was made of the volume of additional water inflow into the municipal sewerage system and its impact on the efficiency of municipal wastewater treatment facilities. It was found that the volume of additional water inflow in the analyzed populated areas ranges from 0.82 to 49.66 %. At the same time, when broken down by populated area by population equivalent, the average share of the annual volume of additional inflow by group varies between 20.97 and 24.54 %, which is a fairly large value and indicates a significant share of additional water entering the sewerage system of the populated area and wastewater treatment facilities. The factor analysis did not reveal a direct functional relationship between the amount of additional water inflow and the equivalent capacity of treatment facilities, as well as the annual volume of precipitation, which indicates that the volume of additional water inflow is dominated by organized additional inflow, caused by the imperfection of the accounting system for certain categories of wastewater entering the municipal sewerage system.

Keywords: sewerage system; wastewater; additional inflow; wastewater accounting; infiltration.

For citation. Dubianok S. A., Denisichik A. I. Specific features of wastewater formation and inflow into municipal sewerage systems in Belarus. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 106–119.

Введение. Изучение условий формирования сточных вод в пределах населенных пунктов является комплексной задачей, поскольку от полноты информации об их количественном и качественном составе зависят выбор технологии очистки, дальнейшая эффективная эксплуатация системы канализации населенного пункта и очистных сооружений, после которых сточные воды сбрасываются в окружающую среду.

Современная система водоотведения в населенных пунктах, как правило, проектируется по раздельной схеме, когда хозяйственно-бытовые и производственные сточные воды централизованно по системе канализации населенного пункта направляются на очистные сооружения населенного пункта (коммунальные очистные сооружения; далее – КОС), а поверхностные сточные воды (дождевые, талые и поливочные) с селитебной территории и территорий предприятий поступают в систему дождевой канализации населенного пункта и далее после очистки (или без нее) сбрасываются в окружающую среду.

Учет воды, поступающей в систему как канализации населенного пункта, так и дождевой канализации населенного пункта, осуществляется предприятием, эксплуатирующим соответствующую систему канализации. Учет сточных вод на уровне населенного пункта представляет собой совокупность данных от абонентов (предприятий и организаций) и потребителей (населения) и сопоставление полученных данных с объемом сточных вод, поступающих на очистные сооружения, зафиксированных прибором учета воды, установленным на входе или на выходе с КОС. Разница между учтенными сточными водами на очистных сооружениях и данными абонентов и потребителей относится к дополнительному притоку. Такой подход к учету дополнительного притока (в виде элементарного баланса по основным составляющим) не является методически обоснованным и позволяет очень укрупненно оценить объемы дополнительного поступления воды на КОС. Однако именно дополнительный приток часто недооценивается при проектировании и эксплуатации систем водоотведения и очистки сточных вод населенных пунктов, хотя его вклад может достигать 30–50 % от общего расхода сточных вод на приемной камере КОС [1].

Поступление дополнительного притока вод в систему канализации населенного пункта имеет ряд последствий как для эксплуатации самих сетей, так и для очистных сооружений. Основные проблемы можно свести к следующим:

- технические – увеличение гидравлической нагрузки на сети канализации и очистные сооружения, ускоренный износ оборудования, работающего в форсированном режиме;
- эксплуатационные – снижение эффективности очистки сточных вод на КОС за счет снижения времени пребывания сточных вод в отдельных сооружениях, колебания расхода и состава сточных вод (концентрации органических загрязнений (БПК₅, ХПК), соединений азота и фосфора);
- экономические – увеличение эксплуатационных затрат на перекачивание сточных вод, уплата экологического налога за сброс дополнительного объема сточных вод, поступившего сверх объемов, оплаченных абонентами и потребителями.

Таким образом, сокращение объемов дополнительного притока является одним из наиболее экономически обоснованных направлений повышения эффективности работы систем водоотведения населенных пунктов, поскольку позволяет снизить нагрузку на КОС без капитального расширения их мощности.

В странах Европейского Союза (далее – ЕС) данной проблеме в последнее десятилетие уделяется повышенное внимание. В частности, Директива ЕС 2024/3019 по очистке городских сточных вод 1991 г., пересмотренная в 2024 г., устанавливает новые требования к управлению инфильтрацией в систему канализации населенного пункта в части включения в национальные программы по развитию сетей водоотведения населенных пунктов оценки инвестиций, необходимых для предотвращения инфильтрации и неправильных подключений (врезок) в сети канализации, с использованием цифровых инструментов и оборудования [2]. В отличие от предыдущих редакций, Директива предписывает учитывать уязвимость систем водоотведения и очистных сооружений при проектировании новой и модернизации существующей инфраструктуры к изменению климата и местным климатическим условиям, включая оценку инфильтрации и ее связь с уровнем грунтовых вод, который может меняться вследствие климатических изменений (паводков, засух).

Обновленная Директива ЕС по очистке городских сточных вод предписывает государствам-членам к 31 декабря 2033 г. разработать комплексные планы управления городскими сточными водами для водосборных бассейнов агломераций численностью 100 000 ЭН (эквивалент населения) и выше, а также не позднее 22 июня 2028 г. составить список агломераций численностью от 10 000 до 100 000 ЭН, в которых с учетом исторических данных, моделирования и современных климатических

прогнозов объем дождевых вод составляет более 2 % годового объема городских сточных вод по параметрам, рассчитанным в условиях сухого периода стока, для последующей разработки для них комплексных планов управления городскими сточными водами к 31 декабря 2039 г. [2].

Исследования дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов проводятся очень активно в ряде стран, включая США, Канаду, Китай, страны ЕС и другие, такими авторами, как Nejat Zeydalinejad, Akbar A. Javadi, James L. Webber, Mingkai Zhang, Yanchen Liu, Gabriel Perez, Jesus D. Gomez-Velez, Stanley B. Grant, Imran Md Azizul Islam, Hao Zhang и др. [3–7]. При описании вод, поступающих в систему канализации населенных пунктов, большинство указанных выше авторов к основным составляющим дополнительного притока вод относят «приток и инфильтрацию» («inflow and infiltration»), определяя таким образом два основных компонента, различающихся по своему происхождению и механизму поступления.

Приток трактуется как вода, которая напрямую поступает в систему канализации населенного пункта через водосточные трубы с крыш, а также из-за дефектов канализационных люков. Источником притока являются дождевые и талые воды. Так как приток непосредственно связан с выпадением осадков и активным снеготаянием, то проявляется практически одновременно с их началом и заканчивается после окончания выпадения осадков и таяния снега. Приток может привести к резкому увеличению нагрузки на сети и сооружения канализации и, как следствие, к нарушению их работоспособности [3–5].

Инфильтрация трактуется как поступление воды в систему канализации населенного пункта через дефекты стыковых соединений сети, повреждения труб и через стенки колодцев. Таким образом, основным источником инфильтрации являются грунтовые воды, а также воды, попавшие в почву после выпадения дождя и таяния снега [3–5].

В случае, когда уровень грунтовых вод поднимается выше уровня залегания сетей канализации, происходит инфильтрация грунтовых вод в сети канализации под гидростатическим напором. Поступление таких инфильтрационных вод характеризуется относительной стабильностью во времени с выраженными сезонными колебаниями, связанными с естественными изменениями уровня грунтовых вод. Исследования показывают, что в условиях высокого уровня грунтовых вод, характерного для застройки вблизи водных объектов или на равнинных территориях во влажный сезон, когда уровень грунтовых вод поднимается, приток вод в канализацию за счет инфильтрации может составлять от 60 до 70 % от общего объема сточных вод, поступающих на КОС [5].

В случае расположения уровня грунтовых вод ниже уровня залегания сетей канализации, инфильтрация вод преимущественно происходит вследствие дождя и таяния снега, когда уровень грунтовых вод временно повышается [6]. Многими авторами этот процесс определяется как дождевая инфильтрация и отмечается, что он наблюдается с некоторой задержкой после выпадения осадков [3].

В странах СНГ вопросы дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов отражены в работах О. К. Шаталовой, Д. А. Данилович, Г. А. Панковой, Н. Ю. Сулимова, Ю. Г. Багаева, Г. А. Самбурского, С. В. Залетова, М. И. Алексеева, Н. П. Куранова, А. А. Бекауловой, В. П. Музыкина, Ю. В. Голод и др. [8–12].

Анализ проводимых исследований в странах СНГ по рассматриваемой тематике указывает, что в них преимущественно используется понятие «дополнительный приток», которое включает гораздо более широкий набор составляющих. При этом внимание в большей степени сосредоточено на изучении отдельных компонентов дополнительного притока вод и условиях его формирования. Таким образом, приток и инфильтрация выделяются всего лишь как один из компонентов дополнительного притока вод в систему канализации населенного пункта.

Предлагаются различные подходы к классификации компонентов дополнительного притока в систему канализации населенного пункта. Большинство авторов выделяют следующие компоненты дополнительного притока вод:

- поверхностные (дождевые и талые) и грунтовые воды, неорганизованно поступающие в системы канализации, т. е. приток и инфильтрация;
- собственные сточные воды организаций водопроводно-канализационных хозяйств (жилищно-коммунальных хозяйств) (далее – ВКХ (ЖКХ)) – при отсутствии учета данных сточных вод предприятиями ВКХ (ЖКХ);
- сточные воды, доставляемые ассенизационным транспортом на КОС – при отсутствии учета данных сточных вод предприятиями ВКХ (ЖКХ);
- сточные воды, отводимые абонентами в систему канализации сверх оплаченных объемов;
- хозяйственно-бытовые и производственные сточные воды, отводимые абонентами и потребителями в систему канализации и не учтенные приборами учета из-за их нечувствительности и из-за ухудшения метрологических характеристик в процессе их эксплуатации;
- сточные воды, образующиеся вследствие самовольного подключения к системе водоснабжения, несогласованного разбора воды через обводные трубопроводы вокруг приборов учета, из гидрантов

и водоразборных колонок, установленных на наружных водопроводных сетях, а также вода, не оплаченная абонентами, не имеющими водосчетчиков, при превышении фактического потребления воды над нормативным [8–11].

Кроме того, в зависимости от способов формирования авторы [12] выделяют и разделяют дополнительный приток на организованный и неорганизованный.

Под *дополнительным организованным притоком* понимаются сточные воды, отведение которых предусмотрено в систему канализации населенного пункта, однако по каким-либо причинам их объем поступления в нее не учитывается. Так, он может формироваться за счет собственных сточных вод, образующихся на объектах организаций ВКХ (ЖКХ), а также сточных вод, привозимых на КОС ассенизационным транспортом. При этом дополнительный организованный приток может включать значительное количество составляющих, доля которых в его составе может варьироваться в разных диапазонах.

Дополнительный неорганизованный приток формируется в первую очередь за счет притока и инфильтрации поверхностных (дождевых и талых) и грунтовых вод в систему канализации, что обусловлено ее инженерными особенностями. Кроме того, к неорганизованному притоку можно отнести объем сточных вод, возникший из-за погрешностей приборов учета у абонентов и потребителей (недоучет), отведения сточных вод сверх оплаченных объемов, коммерческих потерь воды на сетях водоснабжения, самовольного подключения к системе канализации.

Цель работы – оценить основные составляющие дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов Республики Беларусь, источники его формирования и долю от общего объема сточных вод, поступающих на КОС.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования являются воды, поступающие в системы канализации населенных пунктов и на КОС в Республике Беларусь.

Методы исследований включают анализ данных статистической отчетности 1-вода (Минприроды) «Отчет об использовании вод» за 2020–2024 гг. в части объемов образования сточных вод и их сброса в окружающую среду, данных организаций ВКХ (ЖКХ), математическую и статистическую обработку полученных данных, факторный анализ формирования величины дополнительного притока вод.

Результаты и их обсуждение. В системы канализации населенных пунктов, как правило, поступают хозяйственно-бытовые сточные воды потребителей и абонентов, производственные сточные воды и (или) их смесь с хозяйственно-бытовыми сточными водами абонентов, поверхностные сточные воды и дополнительный приток. Каждая из перечисленных категорий сточных вод может поступать в систему канализации населенного пункта как организованно, так и неорганизованно.

Хозяйственно-бытовые сточные воды представляют собой одну из основных категорий сточных вод, поступающих в систему канализации населенного пункта и на КОС. Данная категория сточных вод образуется в жилых, общественных, социальных и производственных объектах в результате обеспечения физиологических и санитарно-гигиенических нужд, а также при приготовлении пищи, мытье посуды и уборке помещений. На КОС поступают хозяйственно-бытовые сточные воды потребителей и абонентов, подключенных к системе канализации населенного пункта; потребителей и абонентов, не подключенных к системе канализации населенного пункта и осуществляющих их отведение на очистные сооружения посредством ассенизационного транспорта; хозяйственно-бытовые сточные воды непосредственно от объектов ВКХ (ЖКХ), на балансе которых находится система канализации населенного пункта [13].

Объемы образования данной категории сточных вод в зависимости от типа объекта имеют суточную неравномерность, напрямую коррелирующую с режимом работы и отдыха населения. Для жилой застройки характерен выраженный двухпиковый суточный расход: пик образования сточных вод приходится на утро и вечер, днем и ночью наблюдается значительное снижение. Образование сточных вод в общественных, социальных и производственных объектах зависит от режима работы данного объекта, но в целом пик расхода приходится на утреннее и дневное время.

Проведенные исследования [13] показывают, что содержание загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод в малых, средних и больших населенных пунктах варьирует в довольно широких диапазонах. При этом по основным загрязняющим веществам, характерным для хозяйственно-бытовых сточных вод, максимальные фактические концентрации в больших населенных пунктах с численностью населения свыше 300 000 человек ниже, чем в малых и средних, что хорошо коррелирует с величиной удельного водоотведения хозяйственно-бытовых сточных вод. Таким образом, чем ниже удельный объем водоотведения, тем более концентрированные хозяйственно-бытовые сточные воды поступают в систему канализации населенного пункта.

Учет хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих от потребителей и абонентов, подключенных к системе канализации населенного пункта, осуществляется неинструментальным методом.

При этом объем хозяйственно-бытовых сточных вод приравнивается к объему водопотребления, что не всегда соответствует действительности. Источником дополнительного притока за счет хозяйственно-бытовых сточных вод могут служить несанкционированные врезки в систему водоснабжения населенного пункта, что приводит к недоучету водопотребления и, как следствие, недоучету хозяйственно-бытовых сточных вод от потребителей. В то же время может наблюдаться обратная ситуация, когда объем водопотребления больше, чем объем водоотведения хозяйственно-бытовых сточных вод, что особенно характерно для частного сектора, где зачастую используют воду из системы водоснабжения населенного пункта для полива садово-огородных культур на приусадебных участках. Влияние этих двух разнонаправленных факторов можно рассматривать как системную погрешность при неинструментальном методе учета сточных вод.

Учет хозяйственно-бытовых сточных вод, доставляемых на очистные сооружения ассенизационным транспортом, как правило, ведется расчетным методом, за исключением случаев, когда на предприятиях ВКХ (ЖКХ) на сети водоотведения предусмотрены станции слива сточных вод с организацией приборного учета. Расчетный метод основывается на данных об объемах резервуаров ассенизационных машин и количестве выполненных рейсов. Такой метод, несмотря на свою простоту, дает приближенную оценку и может приводить к систематическим ошибкам как в сторону занижения объемов сточных вод, поступающих на КОС, так и в сторону их завышения. Занижение объемов происходит в том случае, если по ряду причин осуществляется неполная выкачка сточных вод из резервуаров, присутствуют осадок и воздушные пробки. Завышение объема сточных вод может происходить в случае учета сточных вод по «номинальному» объему резервуара ассенизационной машины, а не по фактическому объему сточных вод, привозимых на сливную станцию. Влияние этих двух разнонаправленных факторов недоучета также можно рассматривать как системную погрешность при неинструментальном методе учета хозяйственно-бытовых сточных вод, доставляемых на очистные сооружения ассенизационным транспортом. Для повышения точности учета поступления на КОС данной категории сточных вод целесообразно оборудовать приборным учетом станции слива сточных вод в системы канализации населенных пунктов.

Производственные сточные воды также занимают значительную долю в общем объеме сточных вод, поступающих на КОС. Данные сточные воды образуются в процессе производственной деятельности предприятия (основное и вспомогательное производство). При этом объем водоотведения и качественный состав производственных сточных вод, в отличие от хозяйственно-бытовых сточных вод, напрямую зависит от вида хозяйственной деятельности предприятия. Например, на объектах металлургии образуются сточные воды, имеющие в своем составе соединения тяжелых металлов, на предприятиях пищевой промышленности образуются сточные воды с преобладанием легкоокисляемых органических веществ белково-жировой природы, на предприятиях по производству алкогольных напитков и пива в составе сточных вод будут преобладать в высоких концентрациях органические загрязнения, соединения азота и фосфора, взвешенные вещества, продукты брожения.

Законодательно закреплено, что учет сточных вод, сбрасываемых в систему канализации населенного пункта, ведется предприятиями инструментальным методом в том случае, если объем сточных вод предприятия превышает $100 \text{ м}^3/\text{сут}$ [14]. В иных случаях учет может проводиться неинструментальным (расчетным) методом и, как правило, приравнивается к объему водопотребления. В ряде случаев фактический объем сточных вод предприятий превышает объем водопотребления предприятия, что связано с образованием дополнительного объема вод в результате технологических процессов предприятия, как, например, при отведении сточных вод вместе с осадком после мойки оборудования, а также в результате работы выпарных установок за счет влаги, выпаренной из сырья. Такая ситуация характерна в большей степени для предприятий пищевой промышленности, однако может иметь место и на других производствах: при процессах переработки аккумуляторных блоков происходит выпаривание влаги из сырья. В то же время при осуществлении технологических процессов на предприятиях могут происходить потери воды (испарение и капельный унос с градирен и иных систем охлаждения, производство и использование пара без возврата конденсата), а также часть воды может использоваться при производстве продукции в качестве сырья и прочего, что относится к безвозвратному водопотреблению на производственные нужды, и также приводит к дисбалансу при учете водоотведения неинструментальными (расчетными) методами. Кроме дополнительных объемов вод, затрачиваемых на технологические процессы, в систему канализации предприятия также могут поступать поверхностные сточные воды, как за счет несанкционированных врезок в систему канализации, так и в результате имеющихся дефектов канализационных люков, при проведении поливочных работ. Кроме того, в систему канализации предприятия могут поступать и грунтовые воды.

Таким образом, объем дополнительного притока вод с территории предприятия может быть достаточно большим, но при этом он также может нивелироваться за счет сокращения объемов отведения производственных сточных вод при большой величине безвозвратного водопотребления.

Для данной категории сточных вод, поступающих в систему канализации населенного пункта, разброс значений может быть очень существенным как в ту, так и в другую сторону, поэтому оценить его в составе баланса водоотведения в виде системной погрешности для всей совокупности предприятий не представляется возможным. Для данной категории сточных вод требуется повышение точности их учета при отведении предприятиями в систему канализации населенного пункта путем закрепления требований по их обязательному инструментальному учету.

Собственные сточные воды предприятий ВКХ (ЖКХ) – это сточные воды, образующиеся в результате деятельности организаций, входящих в сферу водоснабжения и канализации, в результате обеспечения нужд данных объектов.

Собственные сточные воды предприятий ВКХ (ЖКХ) могут включать:

- производственные сточные воды от промывки и дезинфекции водоводов 1-го подъема;
- производственные сточные воды от промывки сетчатых барабанных фильтров и микрофильтров;
- производственные сточные воды от промывки баков реагентов;
- производственные сточные воды от промывки фильтровальных сооружений;
- производственные сточные воды от профилактической очистки и дезинфекции отстойников, осветлителей, резервуаров чистой воды, водонапорных башен;
- производственные сточные воды из сооружений повторного использования воды;
- производственные сточные воды от промывки бактерицидных установок;
- производственные сточные воды от производственных нужд лабораторий организаций ВКХ (ЖКХ);
- производственные сточные воды от профилактической промывки водопроводных сетей;
- производственные сточные воды от промывки и очистки коллекторов, сетей, оборудования и сооружений систем водоотведения;
- хозяйственно-бытовые сточные воды [15].

Кроме того, собственные сточные воды образуются на КОС в результате обеспечения питьевых нужд сотрудников, работы лаборатории, обслуживания объектов очистных сооружений (от промывки сооружений механической очистки, сооружений обработки осадков и др.). Учитывая условия формирования сточных вод, образующихся в результате обеспечения технологических нужд объектов ВКХ (ЖКХ), данные сточные воды могут содержать высокие концентрации целого ряда загрязняющих веществ, например взвешенных веществ и железа общего. Учет собственных производственных сточных вод предприятий ВКХ (ЖКХ) по большинству статей расхода ведется неинструментальным методом или отсутствует.

Поверхностные (дождевые, талые и поливочные) сточные воды могут поступать в систему канализации населенного пункта организованно, т. е. через сеть дождевой канализации предприятия, подключенную к системе канализации населенного пункта, на основании договора между предприятием ВКХ (ЖКХ) и абонентом. Учет данных сточных вод ведется, как правило, неинструментальным (расчетным) методом. Однако при наличии в населенном пункте отдельной системы дождевой канализации отведение поверхностных сточных вод как с объектов производства, так и с территории населенного пункта должно осуществляться именно в систему дождевой канализации населенного пункта. В большинстве случаев поступление поверхностных сточных вод в систему канализации населенного пункта осуществляется неорганизованно при проникновении поверхностных сточных вод через дефекты канализационных люков, а также при поступлении талых вод через дренажные системы подвалов зданий, связанные с внутренней канализацией здания. При расположении колодцев системы канализации на дорожном покрытии, парковках и стоянках в черте населенных пунктов помимо дождевых и талых вод в систему канализации будут попадать и поливочные воды. Дополнительный приток за счет поступления поверхностных сточных вод будет характеризоваться большим объемом поступления за относительно короткий период времени. Кроме того, качественный состав может значительно отличаться в зависимости от места образования поверхностных сточных вод. Также важную роль играет температура поверхностных сточных вод, которая как правило ниже температуры сточных вод, поступающих в систему канализации и на КОС, что может привести к общему снижению температуры сточных вод и их влиянию на работу КОС.

Грунтовые воды в систему канализации населенного пункта могут поступать вследствие инфильтрации за счет трещин, разрывов и коррозионных повреждений в трубах (особенно в изношенных чугунных, керамических, асбестоцементных и бетонных), через неплотные соединения между трубами (муфты, раструбы), где герметичность нарушена из-за осадки грунта, вибраций или некачественной укладки сети; дефектов канализационных колодцев и шахтных частей (трещины в бетонных кольцах, отсутствие гидроизоляции), прорывов в дренажных и дождевых системах канализации; вследствие неправильного проектирования канализационной сети. Также важную роль играют гидролого-геологические характеристики территории и уровень залегания сетей канализации. За счет просачивания через пористые грунты, а также в условиях высокого уровня грунтовых вод (например, в болотистых, пойменных

или прибрежных зонах) даже незначительные микротрещины в сетях становятся причиной инфильтрации грунтовых вод в систему канализации.

В условиях высокого уровня грунтовых вод (например, в поймах рек, зонах с глинистыми и суглинистыми почвами) инфильтрация в системы канализации может происходить круглогодично. Это приводит к постоянной дополнительной нагрузке на КОС. Инфильтрация может усиливаться на небольшой промежуток времени при резком повышении уровня грунтовых вод – после длительных дождей и таяния снега. Сводные данные о видах сточных и иных вод, поступающих в сети канализации населенного пункта, и организации учета объемов их поступления представлены в табл. 1.

Таблица 1. Виды сточных и иных вод, поступающих в систему канализации населенного пункта

Table 1. Types of wastewater and other waters entering sewage systems of settlements

Виды сточных и иных вод	Источник поступления	Вид поступления (организованно/неорганизованно)	Организация учета объема вод и способ учета
Хозяйственно-бытовые сточные	Сточные воды от населения, социальных объектов, подключенных к системе канализации	Организованно	Расчетный/отсутствует
	Сточные воды, доставляемые ассенизационным транспортом	Организованно	Расчетный / инструментальный
	Сточные воды от жизнедеятельности людей на производственных объектах	Организованно	Отсутствует
	Собственные сточные воды организаций ВКХ (ЖКХ)	Организованно	Отсутствует
Производственные сточные	От производственных объектов, подключенных к системе канализации	Организованно	Расчетный / инструментальный
	Собственные сточные воды от объектов организаций ВКХ (ЖКХ)	Организованно	Расчетный/отсутствует
Поверхностные сточные (дождевые, талые, поливочные)	Дождевые, талые и поливочные воды от производственных объектов при подключении их дождевой канализации к системе канализации населенного пункта	Организованно	Расчетный
	Неплотности канализационных люков, несанкционированные подключения дождевой канализации к системе канализации населенного пункта	Неорганизованно	Отсутствует
Грунтовые	Инфильтрация через дефекты трубопроводов сети водоотведения	Неорганизованно	Отсутствует

Учитывая вышеизложенное, дополнительным притоком вод в системы канализации населенных пунктов Республики Беларусь можно считать:

- поверхностные (дождевые, талые и поливочные) сточные воды, неорганизованно поступающие в систему канализации;
- грунтовые воды, неорганизованно поступающие в систему канализации за счет инфильтрации;
- собственные сточные воды предприятий ВКХ (ЖКХ), в состав которых входят хозяйственно-бытовые сточные воды, а также производственные сточные воды, образующиеся в результате работы сооружений водоподготовки, эксплуатации сетей водоснабжения и канализации, включая очистные сооружения сточных вод и иных объектов ВКХ (ЖКХ) – при отсутствии учета данных сточных вод предприятиями ВКХ (ЖКХ);
- сточные воды, доставляемые ассенизационным транспортом – при отсутствии учета данных сточных вод предприятиями ВКХ (ЖКХ);
- сточные воды, отводимые абонентами и потребителями в систему канализации сверх оплаченных объемов, что обусловлено отсутствием у большей части абонентов ВКХ (ЖКХ) инструментального учета сточных вод;
- часть хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод, отводимых в системы канализации, и не учтенных приборами учета из-за их нечувствительности и из-за ухудшения метрологических характеристик в процессе их эксплуатации;

– сточные воды, образующиеся в результате коммерческих потерь воды за счет несанкционированного отбора воды потребителями из системы водоснабжения (самовольное подключение к системе водоснабжения, несогласованный разбор воды через обводные трубопроводы вокруг приборов учета, из гидрантов и водоразборных колонок, установленных на наружных водопроводных сетях), а также вода, не оплаченная абонентами, не имеющими водосчетчиков, при превышении фактического потребления воды над нормативным.

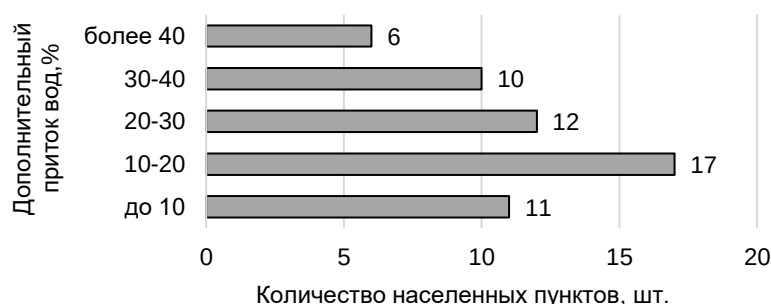
Для оценки количественных характеристик дополнительного притока, поступающего в системы канализации населенных пунктов Республики Беларусь, проведен предварительный анализ данных статистической отчетности 1-вода (Минприроды) «Отчет об использовании вод» в части объемов сброса сточных вод в окружающую среду, а также данных организаций ВХК (ЖКХ) о количественных характеристиках сточных вод, поступающих на КОС, за период 2020–2024 гг. Предварительный анализ данных статистической отчетности показал, что информация об объемах дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов представлена предприятиями ВХК (ЖКХ) по 71 из 201 населенного пункта, имеющего очистные сооружения биологической очистки с последующим сбросом сточных вод в поверхностный водный объект. Необходимо отметить, что ежегодные данные по объемам дополнительного притока за пятилетний период имеются только по 22 населенным пунктам, а за четырехлетний – по 56.

В целом за рассматриваемый период произошло увеличение количества предприятий ВХК (ЖКХ), указывающих дополнительный приток в системы канализации населенных пунктов в статистической отчетности, однако доля таких предприятий составляет около 60 % от их общего количества, что свидетельствует о несовершенстве системы учета различных категорий сточных вод, а также отсутствии единого методического подхода к учету сточных вод, поступающих в системы канализации населенных пунктов из различных источников.

Оценка количественных характеристик дополнительного притока, поступающего в составе сточных вод на КОС за период 2020–2024 гг., проведена по 56 населенным пунктам, по которым имелась исходная информация за 4–5 лет.

Приведенный в статистической отчетности объем дополнительного притока определен балансовым методом в годовом разрезе как разница между годовым объемом сточных вод, поступивших на КОС, и суммой сточных вод от всех абонентов и потребителей, сбросивших сточные воды в систему канализации населенного пункта.

С целью анализа процентного распределения дополнительного притока вод в системы канализации проведена дифференциация населенных пунктов в зависимости от доли дополнительного притока вод. Всего выделено пять групп, где в группу 1 входят населенные пункты с дополнительным притоком вод менее 10 %, в группу 2 – от 10 до 20, в группу 3 – от 20 до 30, в группу 4 – от 30 до 40, в группу 5 – более 40 %. Распределение населенных пунктов по выделенным группам представлено на рисунке.



Распределение населенных пунктов в зависимости от доли дополнительного притока вод, поступающего в системы канализации населенных пунктов

Distribution of settlements based on the share of additional inflow into sewage systems of settlements

Поскольку обновленная Директива ЕС 2024/3019 предусматривает требования по работе с дополнительным притоком, поступающим на очистные сооружения населенных пунктов, в увязке с эквивалентом населения, рассматриваемые 56 населенных пунктов объединены в четыре группы по мощности их КОС по эквиваленту населения (далее – ЭН) с учетом требований [16]:

- группа 1 – ЭН более 100 001 человека (более 6000 кг/сут);
- группа 2 – ЭН от 10 001 до 100 000 человек (от 600 до 6000 кг/сут);
- группа 3 – ЭН от 2001 до 10 000 человек (от 120 до 600 кг/сут);
- группа 4 – ЭН менее 2000 человек (до 120 кг/сут).

В табл. 2 приведены сводные данные о процентном отношении годовой величины дополнительного притока вод к общему объему сточных вод, поступающих на КОС за период 2020–2024 гг.

Таблица 2. Данные о дополнительном притоке вод в системы канализации населенных пунктов за 2020–2024 гг.

Table 2. Data on additional inflow into sewage systems of settlements for 2020–2024

Номер группы	Эквивалент населения	Количество населенных пунктов в группе по эквиваленту населения	Дополнительный приток в группе, %		
			минимальный	максимальный	средний
1	Более 100 001 человека (более 6000 кг/сут)	11	9,34	40,70	24,54
2	От 10 001 до 100 000 человек (от 600 до 6000 кг/сут)	14	2,06	49,66	21,24
3	От 2001 до 10 000 человек (от 120 до 600 кг/сут)	16	0,82	44,68	20,97
4	До 2000 человек (до 120 кг/сут)	15	3,45	44,54	21,20

Среднее доленое значение годового объема дополнительного притока по группам варьируется в диапазоне от 20,97 до 24,54 %, что является достаточно большой величиной и свидетельствует о значительной доле дополнительного притока вод, поступающего на КОС. При этом в населенных пунктах с ЭН более 100 000 человек доля дополнительного притока в среднем выше, чем во всех остальных группах; для них также характерны более высокие минимальные значения доли дополнительного притока. Проведенный анализ данных дополнительного притока по рассматриваемым объектам в помесячном разрезе не выявил прямой функциональной зависимости между мощностью КОС (по величине ЭН) и долей дополнительного притока вод на КОС, хотя очевидно, что эти два показателя косвенно связаны между собой через протяженность сетей канализации.

Анализ распределения средней величины дополнительного притока вод, поступивших в системы канализации населенных пунктов и на КОС, за период 2020–2024 гг. показал, что наибольшее значение дополнительного притока вод наблюдалось в следующих населенных пунктах: г. Волковыске (Гродненская область) – 49,66 %, г. п. Россь (Гродненская область) – 48,13, г. Березино (Минская область) – 44,68, г. п. Коханово (Витебская область) – 44,54, г. Слуцке (Минская область) – 40,70 %. При этом территориальное распределение доли дополнительного притока вод от общего объема сточных вод, поступивших в системы канализации населенных пунктов и на КОС, за период 2020–2024 гг. выглядит следующим образом:

- в Брестской области доля дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов варьировалась от 2,06 % (г. Кобрин) до 37,44 % (г. Малорита). При этом в отдельные годы максимальное его значение зафиксировано на уровне 45,37 % (г. Дрогичин в 2024 г.), минимальное – 0,19 % (г. Кобрин в 2021 г.);

- в Витебской области доля дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов варьировалась от 7,60 % (г. п. Ореховск) до 44,54 % (г. п. Коханово). При этом в отдельные годы максимальное его значение зафиксировано на уровне 54,83 % (г. п. Коханово в 2021 г.), минимальное – 1,44 % (п. Усвиж-Бук в 2024 г.);

- в Гомельской области имеются данные о дополнительном притоке вод в систему канализации только по г. Чечерску, где дополнительный приток составляет 12,64 %. При этом имеются значительные колебания значений дополнительного притока вод в годовом разрезе (от 1,46 % в 2023 г. до 26,11 % в 2024 г.);

- в Гродненской области доля дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов варьировалась от 10,49 % (г. Гродно) до 49,66 % (г. Волковыск). При этом в отдельные годы максимальное его значение зафиксировано на уровне 52,60 % (г. Волковыск в 2024 г.), минимальное – 6,37 % (г. Жодино в 2020 г.);

- в Минской области доля дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов варьировалась от 0,82 % (г. Червень) до 44,68 % (г. Березино). При этом в отдельные годы максимальное его значение зафиксировано на уровне 52,05 % (г. Березино в 2023 г.), минимальное – 0,36 % (г. Червень в 2020 г.).

Анализ данных величин дополнительного притока в разрезе 56 населенных пунктов в сопоставлении с фактическими годовыми величинами выпавших осадков за период 2020–2024 гг. не выявил прямой функциональной зависимости между рассматриваемыми показателями. При этом проводимые научные исследования в разных странах указывают, что величина дополнительного притока (в виде дождевых вод и инфильтрации грунтовых вод) имеет четкую сезонную динамику и корреляцию с величиной выпавших осадков. Отсутствие выраженной корреляции в годовом разрезе может указывать на то, что в величине дополнительного притока в большинстве населенных пунктов преобладает именно дополнительный организованный приток, т. е. сточные воды, отведение которых предусмотрено в систему канализации, однако по каким-либо причинам их объем поступления в нее не учитывается. Очевидно, что в первую очередь требуется повышение достоверности учета поступления в систему канализации населенного пункта таких составляющих дополнительного организованного притока, как собственные сточные воды предприятий ВКХ (ЖКХ) и сточные воды, доставляемые ассенизационным транспортом, организация и систематизация учета которых позволит вычленив их при составлении баланса из дополнительного притока и отражать в балансе отдельными категориями по аналогии с производственными и хозяйственно-бытовыми сточными водами от абонентов и потребителей.

Таким образом, основная задача по оценке дополнительного притока вод в системы канализации и на КОС сведется к расчету основных составляющих дополнительного неорганизованного притока (притока и инфильтрации поверхностных и грунтовых вод), который, в свою очередь, напрямую зависит от природных факторов (климатических, гидрогеологических) и инженерных особенностей канализации (длины, материала и возраста сети, глубины заложения сети по отношению к уровню залегания грунтовых вод).

В настоящее время РУП «ЦНИИКИВР» выполняются такие исследования в части моделирования и оценки поступления дополнительного неорганизованного притока вод в системы канализации населенных пунктов. Результаты изучения источников и механизмов его поступления станут основой для последующей разработки методики расчета дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов Республики Беларусь, а также мероприятий по минимизации его поступления в системы канализации населенных пунктов.

Выводы.

1. Исследования дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов в разных странах указывают, что он включает две основные составляющие: дополнительный организованный приток и дополнительный неорганизованный приток.

Дополнительный организованный приток может включать широкий спектр составляющих, количество которых напрямую зависит от уровня организации системы учета вод, поступающих организованно в систему канализации населенного пункта от абонентов, потребителей и самой эксплуатирующей организации. Соответственно, чем более точно и достоверно ведется такой учет организацией ВКХ (ЖКХ), тем ниже доля дополнительного организованного притока.

Дополнительный неорганизованный приток включает два основных компонента: поверхностные (дождевые и талые) и грунтовые воды, которые неорганизованно поступают в систему канализации. Его объем напрямую зависит от сезонных климатических характеристик и инженерных особенностей системы канализации. Кроме того, к дополнительному неорганизованному притоку можно отнести объем сточных вод, возникший из-за погрешностей приборов учета у абонентов и потребителей (недоучет) и коммерческих потерь воды на сетях водоснабжения. Эти составляющие можно рассматривать и учитывать как системную погрешность при расчете объема дополнительного притока в систему канализации исходя из объема воды, поданной в систему водоснабжения населенного пункта.

2. Поступление дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов рассматривается как одна из существенных проблем, нарушающих работу канализационной сети и очистных сооружений сточных вод в населенном пункте. Обновленная Директива ЕС 2024/3019 [2] предписывает интеграцию оценки инфильтрации как одного из основных компонентов дополнительного притока в национальные программы по развитию сетей водоотведения населенных пунктов, что требует совершенствования подходов к учету сточных вод и разработке мероприятий по минимизации инфильтрации в системы канализации.

3. Проведенный анализ учета дополнительного притока вод, поступающего в системы канализации и на КОС населенных пунктов Республики Беларусь по данным статистической отчетности 1-вода (Минприроды) «Отчет об использовании вод» за 2020–2024 гг. показал, что информация об объемах дополнительного притока вод представлена предприятиями ВКХ (ЖКХ) по 71 из 201 населенного пункта, имеющего очистные сооружения биологической очистки со сбросом сточных вод в поверхностный водный объект. При этом ежегодные данные по объемам дополнительного притока за пятилетний период имеются только по 22 населенным пунктам, а за четырехлетний – по 56. Сложившаяся ситуация

свидетельствует о несовершенстве системы учета различных категорий сточных вод и отсутствии единого методического подхода к учету сточных вод, поступающих в системы канализации населенных пунктов из различных источников.

4. Зафиксированный в статистической отчетности 1-вода (Минприроды) «Отчет об использовании вод» объем дополнительного притока определяется балансовым методом в годовом разрезе как разница между годовым объемом сточных вод, поступивших на КОС, и суммой отведенных сточных вод от всех абонентов и потребителей в систему канализации населенного пункта.

Анализ данных за период 2020–2024 гг. по 56 населенным пунктам Республики Беларусь показал, что больше половины рассматриваемых населенных пунктов имеют дополнительный приток вод в системы канализации до 30 % от всего объема сточных вод, поступивших на КОС. Данный факт указывает на системные проблемы в части учета сточных вод, поступающих в систему канализации, предприятиями ВКХ (ЖКХ).

Высокая доля дополнительного притока в годовом разрезе обусловлена тем, что предприятия ВКХ (ЖКХ) при организации учета вод относят к нему всю разницу между учтенными сточными водами от абонентов и потребителей и общим объемом сточных вод, сбрасываемых после очистных сооружений в окружающую среду. Соответственно, чем менее точно ведется учет сточных вод от абонентов и потребителей (при отсутствии инструментального учета такой учет проводится расчетными методами) и не организован на должном уровне учет собственных сточных вод предприятий ВКХ (ЖКХ), тем больший объем вод будет относиться к дополнительному притоку.

5. Сопоставительный анализ доли дополнительного притока вод, поступающего на КОС, с эквивалентной мощностью очистных сооружений в годовом и помесечном разрезе по 56 населенным пунктам за период 2020–2024 гг. не выявил прямой функциональной зависимости. При этом установлено, что в населенных пунктах с ЭН более 100 000 человек доля дополнительного притока в среднем выше, чем во всех остальных группах; для них также характерны более высокие минимальные значения доли дополнительного притока.

Сопоставительный анализ доли дополнительного притока вод, поступающих в систему канализации и на КОС населенного пункта, с фактическими годовыми величинами выпавших осадков по рассматриваемым населенным пунктам за 2020–2024 гг. не выявил прямой функциональной зависимости между рассматриваемыми показателями, что может указывать на существенное преобладание в величине дополнительного притока именно дополнительного организованного притока (сточные воды, отведение которых предусмотрено в систему канализации, однако по каким-либо причинам их объем поступления в нее не учитывается).

6. Таким образом, величина дополнительного притока вод в систему канализации населенного пункта и на КОС зависит от совокупности факторов, которые по-разному влияют на природу формирования величины дополнительного организованного и неорганизованного притока вод.

Во-первых, необходимо законодательно закрепить понятие «дополнительный неорганизованный приток вод» с указанием категорий сточных вод, которые могут в него включаться.

Во-вторых, требуются повышение достоверности учета и отражение в статистической отчетности поступления в систему канализации населенного пункта таких видов сточных вод, как собственные сточные воды предприятий ВКХ (ЖКХ) и сточные воды, доставляемые ассенизационным транспортом, что позволит при составлении баланса водоотведения вычленив их из дополнительного притока и отражать в балансе отдельными категориями по аналогии с производственными и хозяйственно-бытовыми сточными водами от абонентов и потребителей.

Соответственно, основная задача по оценке дополнительного притока вод в систему канализации и на КОС сведется к расчету основных составляющих дополнительного неорганизованного притока (поверхностных и грунтовых вод), который напрямую зависит от природных факторов (климатических, гидрогеологических) и инженерных особенностей канализации (длины, материала и возраста сети, глубины заложения сети по отношению к уровню залегания грунтовых вод).

В настоящее время РУП «ЦНИИКИВР» проводит исследования в части моделирования поступления дополнительного неорганизованного притока вод в системы канализации и разрабатывает методику расчета дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов Республики Беларусь.

7. Сокращение величины дополнительного притока вод в системы канализации населенных пунктов является наиболее экономически обоснованным направлением повышения эффективности систем водоотведения, позволяющим снизить нагрузку на КОС без повышения их производительности. Для достижения этой цели необходим комплексный подход, сочетающий техническую модернизацию сетей, совершенствование учета вод и адаптацию условий эксплуатации сетей канализации населенных пунктов к климатическим изменениям.

Список использованных источников

1. Денищик, А. И. Оценка динамики поступления неорганизованного притока в составе сточных вод в системы коммунальной канализации населенных пунктов в Республике Беларусь / А. И. Денищик ; науч. рук. С. А. Дубенок // Основные направления развития систем водоснабжения и водоотведения : материалы Респ. студ. науч.-практ. конф., приуроч. к 105-летию Бел. нац. техн. ун-та и 70-летию кафедры «Водоснабжение и водоотведение» в рамках Междунар. молодеж. форума «Креатив и инновации – 2025», г. Минск, 11 дек. 2025 г. / Бел. нац. техн. ун-т ; сост.: С. А. Дубенок, А. А. Колобако. – Мн., 2025. – С. 57–63.
2. Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast) // Official Journal of the European Union. – 12.12.2024. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj/> (date of access: 11.12.2025).
3. Zeydalinejad, Nejat. Global perspectives on groundwater infiltration to sewer networks: A threat to urban sustainability / Nejat Zeydalinejad, Akbar A. Javadi, James L. Webber // Water Research. – 2024. – Vol. 262. – Art. 122098. – DOI: 10.1016/j.watres.2024.122098.
4. Quantifying rainfall-derived inflow and infiltration in sanitary sewer systems based on conductivity monitoring / Mingkai Zhang, Yanchen Liu, Xun Cheng [et al.] // Journal of Hydrology. – 2018. – Vol. 558. – P. 174–183.
5. Perez, Gabriel. The sanitary sewer unit hydrograph model: A comprehensive tool for wastewater flow modeling and inflow-infiltration simulations / Gabriel Perez, Jesus D. Gomez-Velez, Stanley B. Grant // Water Research. – 2024. – Vol. 249. – Art. 120997. – DOI: 10.1016/j.watres.2023.120997.
6. Islam, Imran Md Azizul. Variations of urban water balances considering subsurface sewer fluxes: a hydrologic modeling study / Imran Md Azizul Islam, Amit Kumar, Kun Zhang // Journal of Hydrology. – 2026. – Vol. 664. – Art. 134599.
7. Extraneous water in sewer systems: A Comprehensive review on sewer infiltration and inflow quantification, localization and mitigation / Hao Zhang, Haifeng Jia, Adriaan Mels [et al.] // Water Research X. – 2025. – Vol. 29. – Art. 100426. – DOI: 10.1016/j.wroa.2025.100426.
8. Голод, Ю. В. Совершенствование законодательства Республики Беларусь в области учета сточных вод, поступающих в централизованные системы канализации населенных пунктов / Ю. В. Голод, С. А. Дубенок // XVI Междунар. науч.-практ. симп. и выставка «Чистая вода России – 2021», Екатеринбург, 17–20 мая 2021 г. / Федер. гос. бюдж. учр-ние Рос. науч.-исслед. ин-т комплексного использования и охраны водных ресурсов ; редкол.: М. Г. Морозов [и др.]. – Екатеринбург, 2021. – С. 22–30.
9. Шаталова, О. К. Мониторинг неучтенных расходов сточных вод в системе коммунального водоотведения / О. К. Шаталова, Н. Ю. Акименко // Новые идеи нового века. – 2019. – Т. 3. – С. 382–386.
10. Залетов, С. В. Нормативно-методологические подходы к определению расчетного расхода (залпового сброса) для индивидуальных канализационных очистных сооружений загородных домов / С. В. Залетов, А. А. Ратников // Сантехника. – 2023. – № 1. – С. 40–46.
11. Сулимов, Н. Ю. Особенности внедрения нормативов наилучших доступных технологий в сферу водоотведения / Н. Ю. Сулимов // Экономика строительства. – 2022. – № 7. – С. 13–23.
12. Данилович, Д. А. Оценка объемов неорганизованного дополнительного притока сточных вод в систему канализации / Д. А. Данилович, А. А. Максимова, Е. И. Пупырев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 10. – С. 31–38.
13. Голод, Ю. В. Совершенствование методических подходов к учету хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих на очистные сооружения населенных пунктов Республики Беларусь / Ю. В. Голод, С. А. Дубенок // Журнал Белорусского государственного университета. Серия «Экология». – 2021. – № 4. – С. 89–102.
14. Об утверждении Правил пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 30 сент. 2016 г., № 788 : с изм. и доп. от 16 нояб. 2020 г. № 654 // Бизнес-Инфо / ООО «Профессиональные правовые системы». – Мн., 2026. – 19 с. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600788> (дата доступа: 11.12.2025).
15. Об оценке и расчете технологических расходов воды в централизованных системах питьевого водоснабжения : постановление Министерства жилищно-коммунального хозяйства Респ. Беларусь, 29 дек. 2004 г., № 39 : с изм. и доп. от 8 июля 2019 г. № 8 // Бизнес-Инфо / ООО «Профессиональные правовые системы». – Мн., 2026. – 33 с. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21900594> (дата доступа: 11.12.2025).
16. О нормативах допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 26 апр. 2017 г. № 16 : с изм. и доп. от 29 янв. 2024 г. № 1 // Бизнес-Инфо / ООО «Профессиональные правовые системы». – Мн., 2026. – 12 с. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732141> (дата доступа: 11.12.2025).

References

1. Denishchik A. I. *Ocenka dinamiki postupleniya neorganizovannogo pritoka v sostave stochnykh vod v sistemy kommunal'noj kanalizatsii naselennykh punktov v Respublike Belarus* [Assessment of the dynamics of unorganized inflow of wastewater into municipal sewerage systems of populated areas in the Republic of Belarus]. *Materialy Respublikanskoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Osnovnye napravleniya razvitiya sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya"* [Proceedings of the Republican Student Scientific and Practical Conference "Main Directions for the Development of Water Supply and Sanitation Systems"]. Minsk, 2025, pp. 57–63. (in Russian)

2. Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast). *Official Journal of the European Union*, December 12, 2024. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj/> (accessed December 11, 2025).
3. Zeydalinejad Nejat, Javadi Akbar A., Webber James L. Global perspectives on groundwater infiltration to sewer networks: A threat to urban sustainability. *Water Research*, 2024, vol. 262, art. 122098, DOI: 10.1016/j.watres.2024.122098.
4. Mingkai Zhang, Yanchen Liu, Xun Cheng, David Z. Zhu, Hanchang Shi, Zhiguo Yuan, Quantifying rainfall-derived inflow and infiltration in sanitary sewer systems based on conductivity monitoring. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 558, pp. 174–183.
5. Perez Gabriel, Gomez-Velez Jesus D., Grant Stanley B. The sanitary sewer unit hydrograph model: A comprehensive tool for wastewater flow modeling and inflow-infiltration simulations. *Water Research*, 2024, vol. 249, art. 120997, DOI: 10.1016/j.watres.2023.120997.
6. Imran Md Azizul Islam, Amit Kumar, Kun Zhang. Variations of urban water balances considering subsurface sewer fluxes: A hydrologic modeling study. *Journal of Hydrology*, 2026, vol. 664, part C, art. 134599.
7. Hao Zhang, Haifeng Jia, Adriaan Mels, Huub Rijnaarts, Wei-Shan Chen. Extraneous water in sewer systems: A Comprehensive review on sewer infiltration and inflow quantification, localization and mitigation. *Water Research X*, 2025, vol. 29, art. 100426, DOI: 10.1016/j.wroa.2025.100426.
8. Golod Yu. V., Dubenok S. A. *Sovershenstvovanie zakonodatel'stva Respubliki Belarus' v oblasti ucheta stochnykh vod, postupayushchih v centralizovannye sistemy kanalizatsii naseleennykh punktov* [Improving the legislation of the Republic of Belarus in the field of accounting for wastewater entering the centralized sewerage systems of populated areas]. XVI Mezhdunarodnyj nauchno-prakticheskij simpozium i vystavka "Chistaya voda Rossii – 2021", Ekaterinburg, 17–20 maya 2021 g. [XVI International Scientific and Practical Symposium and Exhibition "Clean Water of Russia – 2021", Yekaterinburg, May 17–20, 2021]. Yekaterinburg, 2021, pp. 22–30. (in Russian)
9. Shatalova O. K., Akimenko N. Yu. *Monitoring neuchtennykh raskhodov stochnykh vod v sisteme kommunal'nogo vodootvedeniya* [Monitoring unaccounted wastewater consumption in municipal wastewater disposal systems]. *Novye idei novogo veka = New Ideas for a New Century*, 2019, no. 3, pp. 382–386. (in Russian)
10. Zaletov S. V., Ratnikov A. A. *Normativno-metodologicheskie podhody k opredeleniyu raschetnogo raskhoda (zalpovogo sbrosa) dlya individual'nykh kanalizatsionnykh ochistnykh sooruzhenij zagorodnykh domov* [Regulatory and methodological approaches to determining the estimated flow rate (volley discharge) for individual sewage treatment plants of country houses]. *Sanetehnika = Plumbing*, 2023, no.1, pp. 40–46. (in Russian)
11. Sulimov N. Yu. *Osobennosti vnedreniya normativov nailuchshih dostupnykh tekhnologiy v sferu vodootvedeniya* [Features of the implementation of standards of the best available technologies in the field of water disposal]. *Ekonomika stroitel'stva = Construction Economics*, no. 7, pp. 13–23. (in Russian)
12. Danilovich D. A., Maksimova A. A., Pupyrev E. I. *Otsenka ob'emov neorganizovannogo dopolnitelnogo pritoka stochnykh vod v sistemy kanalizatsii* [Assessment of the volume of unorganized additional wastewater inflow into the sewerage system]. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Equipment*, 2008, no. 10, pp. 31–38. (in Russian)
13. Golod Yu. V., Dubenok S. A. *Sovershenstvovaniye metodicheskikh podkhodov k uchetu khozyaystvenno-bytovykh stochnykh vod, postupayushchikh na ochistnyye sooruzheniya naseleennykh punktov Respubliki Belarus'* [Improving methodological approaches to accounting for domestic wastewater entering treatment facilities in populated areas of the Republic of Belarus]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Ekologiya" = Journal of the Belarusian State University. Series "Ecology"*, 2021, no. 4, pp. 89–102. (in Russian)
14. *Ob utverzhdenii Pravil pol'zovaniya centralizovannymi sistemami vodosnabzheniya, vodootvedeniya (kanalizatsii) v naseleennykh punktakh* [On approval of the Rules for the use of centralized water supply, sanitation (sewerage) systems in populated areas]. *Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus', 30 sentyabrya 2016 g., № 788* [Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, September 30, 2016, no. 788]. *S izmeneniyami i dopolnleniyami ot 16 noyabrya 2020 g. № 654* [with amended and supplemented on November 16, 2020, no. 654]. *Biznes-Info = Business Info*, 2026, 19 p. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600788> (accessed December 11, 2025). (in Russian)
15. *Ob otsenke i raschete tekhnologicheskikh raskhodov vody v tsentralizovannykh sistemakh pit'yevogo vodosnabzheniya* [On the assessment and calculation of technological water consumption in centralized drinking water supply systems]. *Postanovlenie Ministerstva zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Respubliki Belarus', 29 dekabrya 2004 g., № 39* [Resolution of the Ministry of Housing and Communal Services of the Republic of Belarus, December 29, 2004, no. 39]. *S izmeneniyami i dopolnleniyami ot 8 iyulya 2019 g. № 8* [with amended and supplemented on July 8, 2019, no. 8]. *Biznes-Info = Business Info*, 2026, 33 p. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21900594> (accessed December 11, 2025). (in Russian)
16. *O normativakh dopustimyykh sbrosov khimicheskikh i inyykh veshchestv v sostave stochnykh vod* [On the standards for permissible discharges of chemicals and other substances in wastewater]. *Postanovlenie Ministerstva prirodnnykh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus', 26 aprelya 2017 g. № 16* [Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, April 26, 2017, no. 16]. *S izmeneniyami i dopolnleniyami ot 29 yanvarya 2024 g. № 1* [with amended and supplemented on January 29, 2024, no. 1]. *Biznes-Info = Business Info*, 2026, 12 p. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732141> (accessed December 11, 2025). (in Russian)

Информация об авторах

Дубенок Снежана Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение» Белорусского национального технического университета (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь). E-mail: dsnega@list.ru

Денищик Алеся Игоревна – научный сотрудник республиканского унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов» (ул. Славинского, 1/2, 220086, г. Минск, Беларусь). E-mail: alesya.d210@gmail.com

Information about the authors

Sniazhana A. Dubianok – Ph. D. (Technical), Associate Professor of the Department of Water Supply and Sanitation Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus). E-mail: dsnega@list.ru

Alesya I. Denischik – Research assistant of Republican Unitary Enterprise “Central Research Institute for Complex Use of Water Resources” (1/2, Slavinskogo St., Minsk, Belarus). E-mail: alesya.d210@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-120-131>
УДК 504.54.062.001.26(476)

Поступила в редакцию 07.05.2026
Received 07.05.2026

ОЦЕНКА ПЛАНИРОВОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИГОРОДНЫХ ЛЕСОВ МИНСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

М. И. Струк, С. Г. Живнач

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Приведена сравнительная оценка факторов, определяющих пространственную организацию пригородных лесов Минска: природно-ландшафтного строения территории и организующего влияния города на природопользование в ее пределах. Установлена преобладающая роль второго из них, что проявляется в последовательном снижении интенсивности природопользования от города к периферии и обуславливает обратное направление изменения лесистости: от минимальной величины – 23 % в ближнем 20-километровом поясе до 44 % – в удаленном (40–60 км).

Определена типологическая структура лесов, показавшая, что более половины из них составляют сосновые леса, которые обладают высоким оздоровительным эффектом и благоприятными предпосылками рекреационного использования. Представлено ранжирование территории по эколого-рекреационной значимости лесов, исходя из эффективности выполнения ими санитарно-гигиенической, водоохраной и рекреационной функций в интересах города. Выделены четыре зоны: ближняя, средняя, периферийная и водосборного бассейна Вилейского водохранилища, для каждой из которых указаны приоритетные направления охраны лесов.

Выявлена непригодность действовавшего ранее управленческого механизма охраны пригородных лесов, предполагавшего выделение вокруг города зеленой зоны с отнесением входящих в ее состав лесов к 1-й группе лесопользования, в связи с упразднением данной их категории. Предложен альтернативный вариант его замены, предусматривающий переход от формального выделения границ зеленой зоны города к ее планированию в составе проекта планировки пригородной зоны, с установлением режимов лесопользования в соответствии с эколого-рекреационным ранжированием лесов.

Ключевые слова: лес; пригородная территория; оценка; эколого-рекреационная значимость; ранжирование; зеленая зона; планировочная организация.

Для цитирования: Струк М. И., Живнач С. Г. Оценка планировочной организации пригородных лесов Минской агломерации // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 120–131.

ASSESSMENT OF THE PLANNING ORGANIZATION OF SUBURBAN FORESTS OF THE MINSK AGGLOMERATION

M. I. Struk, S. G. Zhivnach

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Annotation. This article presents a comparative assessment of the factors determining the spatial organization of Minsk's suburban forests: the natural landscape structure of the territory and the city's organizational influence on natural resource management within its boundaries. The predominant role of the latter is established, manifested in a consistent decrease in the intensity of natural resource management from the city outward and leading to a reverse trend in forest cover: from a minimum of 23 % in the immediate 20-kilometer zone to 44 % in the outer zone (40–60 km).

The typological structure of the forests is determined, revealing that more than half are pine forests, which have a high health-improving effect and are favorable for recreational use. The article presents a ranking of the territory by the ecological and recreational significance of forests, based on their effectiveness in fulfilling sanitary, hygienic, water protection, and recreational functions for the city. Four zones are identified: near, middle, peripheral, and the Vileyka Reservoir catchment area. Priority areas for forest protection are identified for each zone.

The study revealed the inadequacy of the previous management mechanism for protecting suburban forests, which envisioned the designation of a green zone around the city and the classification of its forests as Group 1 forest management, due to the abolition of this category. An alternative is proposed, which involves transitioning from formally defining the boundaries of the city's green zone to planning it as part of the suburban zone planning project, with forest management regimes established in accordance with the ecological and recreational ranking of forests.

Keywords: forest suburban area; assessment; ecological and recreational significance; ranking; green zone; planning organization.

For citation: Struk M. I., Zhivnach S. G. Assessment of the planning organization of suburban forests of the Minsk agglomeration. *Nature Management*, 2026, no 1, pp. 120–131.

Введение. Прилегающие к городу леса играют исключительно важную роль в обеспечении его нормальной жизнедеятельности. Подобная их значимость обусловлена, прежде всего, выполнением этими лесами экологической и рекреационной функций в интересах города. Они очищают поступающий на городскую территорию атмосферный воздух от пыли и загрязняющих веществ, насыщают его кислородом и фитонцидами, смягчают температурные колебания и силу ветра, регулируют гидрологический режим местных водных объектов и защищают их от загрязнения, создают необходимую природно-ресурсную основу формирования зон массового отдыха и оздоровления населения.

Эффективность выполнения пригородными лесами указанных функций зависит от занимаемой ими площади, присущих им свойств, а также размещения. Отсюда важность их адекватной планировочной организации, которая должна опираться на соответствующую ее оценку.

Достижение на пригородной территории оптимальной организации лесов имеет особую сложность в силу существующей высокой интенсивности оказываемых на нее антропогенных воздействий. Данная территория обладает конкурентными преимуществами для размещения населения и сельскохозяйственного использования, в ее пределах концентрируются различные объекты транспортно-логистической инфраструктуры, теплоэнергетического обеспечения, коммунального обслуживания города, отдыха и оздоровления городского населения, что создает угрозу вырубки лесов. Кроме того, эти леса испытывают высокие рекреационные нагрузки, способные вызвать их дигрессию.

Указанные воздействия на пригородные леса усиливаются в случае перехода городского развития на агломерационную стадию. Именно такой переход характерен для современного этапа развития г. Минска, что, очевидно, должно учитываться при планировании организации этих лесов.

Между тем вопросы подобного рода проработаны недостаточно, и это притом, что проводившиеся исследования пригородных лесов охватывали достаточно широкий спектр направлений. Больше всего они затрагивали оценку их рекреационной дигрессии, которая выполнялась для пригородных лесов многих городов [1]. Кроме того, предметом изучения этих лесов применительно к отдельным городам выступала также оценка их экологического состояния [2] и ассимилирующих способностей [3]. Европейской экономической комиссией ООН акцентировалось внимание на устойчивом ведении лесного хозяйства в данных лесах [4] и др.

Рассматриваемые пригородные леса Минска ранее также выступали объектом изучения, включая их пространственное распределение. В частности, исследовались размещение этих лесов в зависимости от удаления от города и по сторонам горизонта, фрагментация, водоохранная роль в бассейнах рекреационных водохранилищ [5–7].

Выполненные наработки дают представление о современной организации указанных лесов. В то же время они нуждаются в дополнении в связи с возникновением новых угроз для этих лесов, обусловленных активизацией агломерационных процессов и изменениями механизма управления ими.

Цель работы – провести оценку планировочной организации пригородных лесов Минска на агломерационной стадии городского развития и обосновать пути ее оптимизации.

Задачи исследования:

- оценка факторов, определяющих размещение пригородных лесов;
- оценка эколого-рекреационной значимости пригородных лесов в зависимости от их размещения;
- обоснование планировочных мер по охране пригородных лесов.

Материалы и методы исследования. Перечень необходимых для исследования материалов обусловлен его многоплановым характером, включающим вопросы социально-экономического развития территории, ее природных свойств, экологического состояния. Фактическую основу работы составили данные национальной статистической отчетности, Национальной системы мониторинга окружающей среды, космической съемки, картографических источников. Также понадобилось использовать нормативно-законодательную и планировочную документацию, имеющую отношение к изучаемой теме.

В качестве адекватного исследовательского инструмента применительно к выполняемой оценке организации рассматриваемых лесов выступил эколого-географический подход. В нем интегрируются средоформирующие способности лесов и их пространственное положение.

Указанный подход базируется на совместном использовании экосистемной модели исследования с географическими моделями дифференциации территории. Экосистемная модель организована по типу «дом – хозяин». Она обеспечивает направленность оценки, определяет ее субъект. В данном случае таким субъектом выступает город, а леса пригородной территории являются элементами его «дома».

Набор географических моделей дифференциации пригородной территории должен быть таким, чтобы, во-первых, отразить ее природно-хозяйственную неоднородность, определяющую различия в хозяйственном использовании территории и сохранность лесов в ее пределах; во-вторых, показать их роль в обеспечении экологических и рекреационных потребностей города [8]. В первом случае в данный набор следует включить две модели: природно-ландшафтную и поясную, во втором – ту же поясную, а также бассейновую.

Природный ландшафт выступает как генетически и морфологически однородная единица дифференциации территории, которая комплексно отражает присущие ей свойства и обладает сходными условиями природопользования, а также реакцией на внешние воздействия. Именно природный ландшафт обычно выбирается в качестве основной пространственной единицы геоэкологических исследований [9, 10].

Различные типы ландшафтов в разной степени пригодны для хозяйственного использования. Те из них, которые обладают более высоким почвенным плодородием, а также удобны для обработки, отличаются повышенным сельскохозяйственным освоением. Другие, характеризующиеся сравнительно низким плодородием почв и сложным рельефом, в большей мере сохраняются в естественном состоянии, что относится и к лесам. Поэтому ландшафтное строение территории должно рассматриваться как один из ведущих факторов их пространственной организации.

Поясная модель дифференциации пригородной территории отражает, прежде всего, прямую зависимость интенсивности ее хозяйственного использования от удаления от города. Кроме того, она также характеризует роль лесов в оздоровлении его воздушного бассейна: чем ближе к городу они располагаются, тем выше будет их оздоровительный эффект.

Необходимость учета бассейновой дифференциации пригородной территории для оценки организации лесов следует из наличия в ее пределах водоемов, используемых для водоснабжения города и отдыха проживающих в нем жителей. Качество воды и режим функционирования этих водоемов в решающей степени определяются экологическим состоянием их водосборных бассейнов, которое в значительной степени зависит от их залесенности.

Для количественного отражения разнородных, значимых для решаемых задач характеристик лесов и обеспечения их сопоставления использован метод балльной оценки. Он предполагает присвоение этим характеристикам численных значений, представляемых в одинаковых условных единицах – баллах – с последующим их обобщением и получение интегрального показателя.

Факторы пространственного распределения пригородных лесов. Размещение пригородных лесов определяется взаимодействием двух основных факторов: природно-ландшафтного и социально-экономического, в данном случае обусловленного организующим влиянием крупнейшего города. Роль первого из них отражает ландшафтная структура территории, второго – видовая структура землепользования.

Ландшафтную структуру пригородной территории Минска образуют девять родов ландшафтов [11]. Они относятся к трем высотным уровням: возвышенностей (29 % территории), равнин (47 %) и низин (24 %).

Степень антропогенного преобразования ландшафтов для сельскохозяйственных нужд зависит от естественного плодородия их почв и расчленения рельефа. Более высокая она у ландшафтов с суглинистыми и торфяными почвами – холмисто-моренно-эрозионных возвышенностей, вторично-моренных и морено-зандровых равнин, озерно-болотных низин и пойм. Соответственно, они отличаются сравнительно низкой лесистостью. Выполненные для исследуемой территории расчеты показали, что она изменяется от 29 до 35 %.

В большей мере сохранились леса у ландшафтов с более широким распространением мало-плодородных песчаных почв – водно-ледниковых равнин, озерно-аллювиальных и аллювиально-террасированных низин, а также с высоким расчленением рельефа – камово-моренно-озерных возвышенностей. Их лесистость превышает 39 %, достигая 53 %.

По отношению к поясам пригородной территории, расположенным на различном удалении от города, более благоприятные природно-ландшафтные предпосылки сохранения лесов складываются в ближнем и наиболее удаленном из них, где совместная доля менее пригодных для сельскохозяйственного освоения ландшафтов примерно одинакова и составляет около 40 % (табл. 1). В среднем поясе эта доля почти в 2 раза ниже, соответственно, подобные предпосылки ухудшаются.

В структуре земель пригородной территории представлены, в частности, виды, направленные на удовлетворение потребностей города, а также получившие преимущества для развития в силу своего пригородного положения. Между этими видами объективно складывается конкуренция за пространство, которая должна усиливаться по мере приближения к городу. В таких условиях сохранение лесов как одного из видов земель в близлежащем к нему поясе становится особенно сложным.

К основным видам земель, связанным с преобразованием природной среды и сведением лесов, относятся земли сельскохозяйственные, селитебные, под водными объектами (водохранилищами), а также дорогами. Для определения их влияния на лесистость территории, в зависимости от удаления от города, с учетом приведенных выше ландшафтных предпосылок, рассмотрено распределение этих видов совместно с лесами по выделенным поясам.

Преобладающим видом земель на исследуемой территории являются сельскохозяйственные земли. Они занимают 44,5 % ее площади, что на 6,3 % выше средней для Беларуси величины (табл. 2).

Таблица 1. Структура ландшафтов по поясам пригородной территории Минска, расположенным на различном удалении от города, %**Table 1. Landscape structure by belts of the suburban area of Minsk, located at different distances from the city, %**

Ландшафт	Пояс			Всего
	0–20 км	20–40 км	40–60 км	
С высокой лесистостью				
Камово-моренно-эрозионные возвышенности	13,5	2,3	6,6	6,7
Водно-ледниковые равнины	25,3	19,4	30,6	26,8
Озерно-аллювиальные пологоволнистые низины	0,3	0,4	1,7	1,1
Аллювиально-террасированные низины	-	0,3	1,9	1,1
Всего	39,1	22,4	40,8	35,7
С умеренной и низкой лесистостью				
Холмисто-моренно-эрозионные возвышенности	44,2	48,4	7,0	21,8
Вторично-моренные равнины	1,6	6,4	22,0	16,6
Морено-зандровые волнистые равнины	0,2	5,4	7,3	4,2
Поймы	4,3	5,5	7,5	6,5
Озерно-болотные низины	10,6	11,9	15,4	15,2
Всего	60,9	77,6	59,2	64,3

Примечание. Расчеты сделаны по составленной ландшафтной карте М 1 : 200 000.
 Note. Calculations were made based on the compiled landscape map M 1 : 200 000.

Таблица 2. Видовая структура земель по поясам пригородной территории Минска, расположенным на различном удалении от города, %**Table 2. Structure of land types by belts of Minsk suburban area, located at different distances from the city, %**

Земли	Пояс			Всего
	0–20 км	20–40 км	40–60 км	
Сельскохозяйственные	51,9	48,3	40,6	44,5
Селитебные	14,1	7,9	6,2	8,0
Под водоемами	1,9	0,5	0,3	0,5
Под лесами	23,1	33,8	43,9	37,0
Прочие	9,0	9,5	9,0	10,0

Примечание. Расчеты сделаны на основе данных работы [12].
 Note. Calculations were made based on data from [12].

Селитебные земли представлены главным образом сельскими населенными пунктами. Их доля в земельной структуре составляет почти 8 %, что в 2 раза выше среднего для страны показателя.

Все расположенные на пригородной территории водоемы имеют искусственное происхождение. В силу ее размещения на водораздельной возвышенности с прилегающими равнинами показатель озерности здесь имеет нулевое значение. На долю же искусственных водоемов приходится 0,5 % площади.

Дорожная сеть служит причиной не только сведения лесов, но и их раздробленности. В ее составе преобладают автомобильные дороги, плотность которых на порядок выше по сравнению с железными – 345 и 27 км/1000 км² соответственно.

По отношению ко всем указанным видам земель прослеживается одинаковая направленность изменения показателей их распространения: от максимальных величин в ближнем поясе к промежуточным – в среднем и минимальным – в периферийном. Самая высокая контрастность выражена для площади под водохранилищами – превышение наибольшего значения показателя над наименьшим достигает 6,7 раза, для селитебных земель она уменьшается до 2,3 раза и сельскохозяйственных – до 1,3 раза. В последнем случае находит отражение преимущественное значение фактора удаленности от города по сравнению с ландшафтными предпосылками.

Согласно приведенному распределению земель, преобразованных хозяйственной деятельностью, доля лесов последовательно уменьшается в обратном направлении – от периферийного пояса к среднему и ближнему: с 43,9 % до 33,8 и 23,1 %, или в 1,3 и 1,9 раза соответственно. В этом же направлении повышается и раздробленность лесов, чему способствует двукратное различие в плотности автомобильных и четырехкратное – железных дорог. Средний размер лесных участков в ближнем поясе составляет 370 га, что в 1,8 раза меньше, нежели в среднем и в 4,3 раза – в периферийном.

С уменьшением площади лесных участков и их изолированного положения снижается устойчивость лесов к внешним воздействиям. Соответственно, наименьшая ее величина будет иметь место в ближнем поясе, увеличиваясь к периферии.

Высокая степень антропогенного преобразования пригородной территории обусловила существенную трансформацию исходной лесной растительности. Изначально распространенные в ее пределах коренные леса были в основном заменены псевдокоренными сообществами, производными лесами и лесными культурами [13].

В современной типологической структуре пригородных лесов ведущее положение принадлежит соснякам, которые занимают более половины всей лесной площади (табл. 3). Примерно четвертая их часть приходится на широколиственно-еловые и еловые леса и десятая – на мелколиственные.

Таблица 3. Типологическая структура лесов пригородной территории Минска по поясам, расположенным на различном удалении от города, %

Table 3. Typological structure of forests in the Minsk suburban area by belts located at different distances from the city, %

Леса	Доля в пределах всей территории, %	Доля по поясам, %		
		0–20 км	20–40 км	40–60 км
Сосновые	56,6	43,5	46,2	69,4
Еловые	7,6	1,5	8,4	6,6
Широколиственно-еловые	17,3	38,3	19,2	11,7
Широколиственные	1,1	2,9	0,8	0,4
Мелколиственные	10,2	9,9	13,0	5,4
Произрастающие на болотах	7,4	3,9	12,3	6,5

Примечание. Расчеты сделаны на основе данных работы [14].

Note. Calculations were made based on data from [14].

В пояском распространении сосновых лесов, с одной стороны и еловых совместно с широколиственно-еловыми, с другой, прослеживается обратная зависимость. Доля первых по мере удаления от города возрастает, вторых снижается. Различия в занимаемых ими площадях сильно повышаются. Если в ближнем поясе доля сосновых лесов превышает таковую широколиственно-еловых и еловых только в 1,1 раза, то в дальнем – в 3,8 раза.

Оценка эколого-рекреационной значимости пригородных лесов в зависимости от их размещения. Эколого-рекреационная значимость пригородных лесов определяется их ролью в обеспечении экологических и рекреационных интересов города. В первом случае ее будут характеризовать два критерия, отражающие их влияние, во-первых, на оздоровление его воздушного бассейна (*санитарно-гигиенический критерий*), во-вторых, на качество используемых для нужд города водных ресурсов и объектов (*водоохранный критерий*). Во втором случае – интенсивность использования лесов для отдыха городского населения (*рекреационный критерий*).

Рассматриваемые леса пригородной территории Минска по своему формационному составу достаточно благоприятны для выполнения эколого-рекреационных функций, что связано с преобладанием в их типологической структуре сосняков. Сосновые леса по сравнению с еловыми и широколиственно-еловыми обеспечивают больший оздоровительный эффект, обладают лучшими эстетическими свойствами и более высокой устойчивостью к рекреационным нагрузкам [15].

В отношении размещения лесов основным фактором, определяющим их санитарно-гигиеническую эффективность, является фактор удаления этих лесов от города. По мере увеличения такого удаления она снижается. Максимальный эффект обеспечивают леса, расположенные в непосредственной близости от городских границ, особенно формирующие зеленые клинья, проникающие в город. В этом случае их оздоровительное влияние усиливается в 3–4 раза по сравнению с изолированным размещением этих лесов [16].

По водоохранному критерию более высокую значимость должны получить леса, расположенные в пределах бассейнов водных объектов, используемых для водоснабжения города и отдыха городских жителей. Подобная значимость повышается в случае размещения лесов на землях с крутыми склонами, которые подвергаются почвенной эрозии в случае сведения лесной растительности, вследствие чего риски заиления и загрязнения водотоков и водоемов усиливаются.

На пригородной территории Минска особенно важные для города водные объекты располагаются преимущественно в ближнем поясе. В его пределах находятся все загородные подземные водозаборы, откуда осуществляется городское водоснабжение, а также большая часть водохранилищ рекреационного назначения вместе с их водосборными бассейнами. Исключение составляет Вилейское водохранилище как водоем-донор для г. Минска, которое размещается в удаленном поясе.

Водоохранное значение лесов ближнего пояса усиливается вследствие его ландшафтного строения, представленного главным образом эрозионно опасными возвышенными ландшафтами: холмисто-моренно-эрозионным и камово-моренно-эрозионным. Кроме того, в его пределах из-за наличия подземных водозаборов активизируется инфильтрационный водный режим, повышающий риски проникновению загрязняющих веществ в подземные водоносные горизонты.

Самой высокой интенсивностью рекреационного использования выделяются пригородные леса, примыкающие к водоемам. К местам подобного рода сочетаний приурочено размещение крупных зон массового неорганизованного отдыха, а также рекреационно-оздоровительных объектов.

На пригородной территории Минска преобладающее количество указанных зон и объектов приурочено к ближнему поясу. На его долю приходится, в частности, концентрация 85 % от общей проектной численности неорганизованных отдыхающих, а также более половины детских оздоровительных лагерей, санаторно-курортных организаций и агроусадб (табл. 4).

Таблица 4. Размещение рекреационно-оздоровительных объектов по поясам пригородной территории Минска, расположенным на различном удалении от города

Table 4. The distribution of recreational and health facilities in the Minsk suburban area located at different distances from the city

Пояс с удалением от г. Минска, км	Рекреационно-оздоровительные объекты				
	Детские оздоровительные лагеря, ед.	Санаторно-курортные организации, ед.	Агроусадьбы, ед.	Всего	
0–20	31	28	83	142	53
20–40	21	13	42	76	28
40–60	9	12	30	51	19
<i>Всего</i>	<i>61</i>	<i>53</i>	<i>155</i>	<i>269</i>	<i>100</i>

Примечание. Расчеты сделаны на основе данных работ [12, 17,18].

Note. Calculations were made based on data from [12, 17,18].

Приведенные пространственные различия в выполнении пригородными лесами Минска санитарно-гигиенической, водоохраной и рекреационной функций в интересах города обеспечивают возможность ее соответствующего ранжирования, для чего применена методика балльной оценки. С этой целью применительно к каждой из отмеченных функций установлены три ступени ранжирования с повышающими коэффициентами для первой из них 1,1 – умеренное значение, второй – 1,2 – высокое и третьей – 1,3 – наиболее высокое значение. В соответствии с этими ступенями вначале получили частные схемы зонирования исследуемой территории, а затем объединили их путем суммирования коэффициентов в интегральную схему.

По санитарно-гигиеническому критерию самый высокий коэффициент (1,3) получила непосредственно прилегающая к городу территория в радиусе около 20 км от его границ (примерно соответствует границам лесопаркового пояса города); высокий (1,2) – средняя зона в поясе 20–40 км (соответствует границам городской агломерации); умеренный (1,1) – удаленная зона в поясе свыше 40 км (соответствует границам пригородной и зеленой зон города с учетом водосборного бассейна Вилейского водохранилища). В таком распределении выделенных зон находит отражение обратная зависимость оздоровительного влияния пригородных лесов на воздушный бассейн города от их удаления от него.

По водоохранному критерию самый высокий коэффициент присвоен так же, как и в предыдущем случае, ближней от города зоне, где располагаются подземные водозаборы и основные рекреационные водоемы, используемые для водоснабжения города и массовой рекреации и оздоровления городского населения. Кроме того, такой же коэффициент получила территория водосборного бассейна Вилейского водохранилища, из которого поступают водные ресурсы для нужд Минска.

Высокий водоохранный коэффициент установлен для срединной части пригородной территории. Важность водоохраной функции местных лесов связана с размещением в ее пределах четырех из шести городов-спутников г. Минска, которые в средне- и долгосрочной перспективе должны получить активное развитие – Логойска, Смолевич, Руденска, Дзержинска, а также индустриального парка Великий камень. Планируемый рост численности их населения и производственного потенциала, очевидно, приведет к увеличению потребностей в водных ресурсах, а, следовательно, и повысит водоохранную значимость лесов.

Для периферийной части пригородной территории, которая не входит в водосборный бассейн Вилейского водохранилища, определен коэффициент, составляющий 1,1.

По рекреационному критерию выделены те же ареалы, что и по санитарно-гигиеническому, за исключением части территории, относящейся к бассейну Вилейского водохранилища. Этой части, несмотря на ее большое удаление от города, присвоен высокий коэффициент (1,2), поскольку на базе данного водоема создана крупная зона отдыха и оздоровления городского населения.

На основе обобщения отмеченных частных схем получена интегральная схема ранжирования лесов пригородной территории Минска по выполняемым эколого-рекреационным функциям (см. рисунок).

Всего выделено четыре зоны:

I – прилегающая к городу, с размещением лесов наивысшей значимости для выполнения санитарно-гигиенической, водоохраной и рекреационной функций; суммарный балл – 3,9;

II – водосборного бассейна Вилейского водохранилища, с размещением лесов наивысшей значимости для выполнения водоохраной и высокой – санитарно-гигиенической и рекреационной функций; суммарный балл – 3,7;

III – срединная, с размещением лесов высокой значимости для выполнения санитарно-гигиенической, водоохраной и рекреационной функций; суммарный балл – 3,6;

IV – периферийная, с размещением лесов умеренной значимости для выполнения санитарно-гигиенической, водоохраной и рекреационной функций; суммарный балл – 3,3.

Наряду с отображением на картосхеме четырех выделенных интегральных зон, на ней также размерами условных знаков показана значимость каждой из них по выполнению отдельных функций – санитарно-гигиенической, водоохраной, рекреационной. Кроме того, представлены элементы Национальной экологической сети Республики Беларусь и выделены локальные ареалы зеленых зон малых городских поселений и основных пригородных зон массового отдыха и оздоровления жителей Минска. Такое содержание картосхемы позволяет определить приоритеты деятельности по охране лесов и ее направленность.

Планировочные меры охраны пригородных лесов. Деятельность по охране пригородных лесов включает в себя такие направления, как их сохранение, внедрение и соблюдение экологически приемлемых режимов использования, а также преобразование и восстановление. Все они применимы по отношению ко всей территории, но их соотношение в ее разных частях не должно быть одинаковым. Для каждой из них нужно определять свои приоритеты.

В основу выбора указанных приоритетов должна быть положена приведенная выше картосхема ранжирования территории по эколого-ресурсной значимости лесов. Выделенные на ней зоны, отражающие их санитарно-гигиеническое, водоохранное и рекреационное значение для города, подобный выбор обеспечивают.

Для ближней к городу части пригородной территории, где доля лесов минимальная, а их значимость по всем критериям максимальная, основное значение имеют следующие направления:

- сохранение имеющихся лесов, в первую очередь образующих зеленые клинья, проникающие в город, расположенных вблизи подземных водозаборов и в бассейнах основных водохранилищ, а также формирующих целостные, большие по площади массивы;

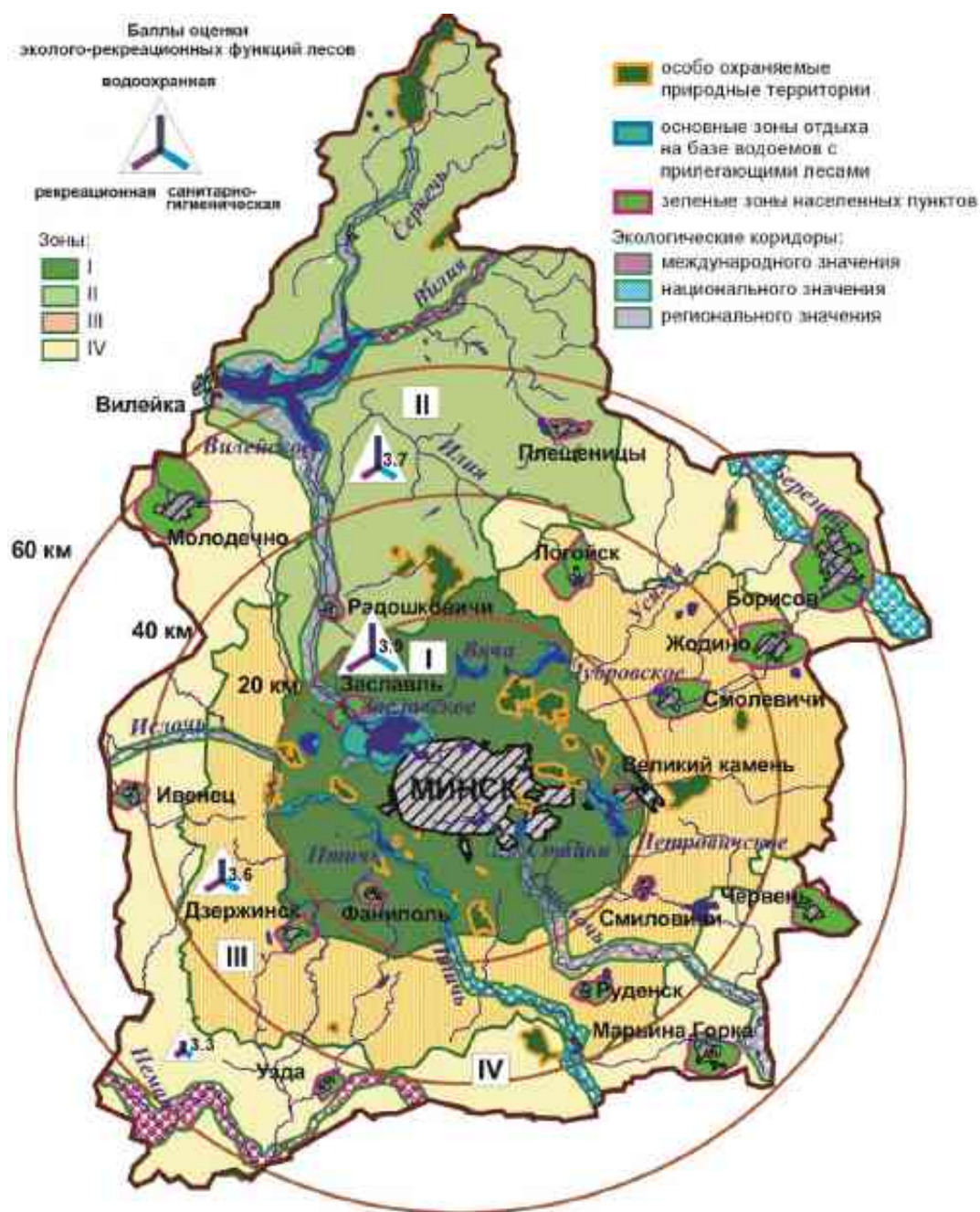
- обеспечение взаимосвязи между лесами для повышения их устойчивости к внешним воздействиям путем сохранения естественных экосистем речных долин, создания ползащитных и придорожных лесополос;

- обеспечение приоритетного выбора лесного направления рекультивации деградированных земель;

- облесение выводимых из оборота малоплодородных и подверженных интенсивной эрозии сельскохозяйственных земель;

- озеленение расположенных в рассматриваемом поясе населенных пунктов, особенно в его малолесной южной части;

- преобразование лесов, интенсивно используемых для отдыха, в лесопарки с целью повышения их привлекательности и устойчивости к рекреационным нагрузкам; к таковым относятся, главным образом, леса, прилегающие к водохранилищам и выступающие ядрами пригородных зон отдыха.



Ранжирование пригородной территории Минска по эколого-рекреационной значимости лесов.

З о н ы: I – прилегающая к городу, с размещением лесов наивысшей значимости для выполнения санитарно-гигиенической, водоохраной и рекреационной функций; II – водосборного бассейна Вилейского водохранилища, с размещением лесов наивысшей значимости для выполнения водоохраной и высокой – санитарно-гигиенической и рекреационной функций; III – срединная, с размещением лесов высокой значимости для выполнения санитарно-гигиенической, водоохраной и рекреационной функций; IV – периферийная, с размещением лесов умеренной значимости для выполнения санитарно-гигиенической, водоохраной и рекреационной функций

Ranking of Minsk suburban area by ecological and recreational forest value.

Z o n e s: I – adjacent to the city, containing forests of the highest importance for sanitary and hygienic, water protection, and recreational functions; II – the Vileyka Reservoir catchment area, containing forests of the highest importance for water protection and high importance for sanitary and hygienic and recreational functions; III – middle, containing forests of high importance for sanitary and hygienic, water protection, and recreational functions; IV – peripheral, containing forests of moderate importance for sanitary and hygienic, water protection, and recreational functions

Для водосборного бассейна Вилейского водохранилища с его умеренной и высокой лесистостью, создающей благоприятные условия формирования гидрологического режима территории, главное внимание следует уделять водоохраной роли лесов, предусматривающей:

- соблюдение экологически приемлемых режимов лесопользования;
- формирование водоохранных зон рек с сохранением входящих в их состав лесов;
- преобразование лесов, примыкающих к Вилейскому водохранилищу и активно используемых

для отдыха и оздоровления населения, в лесопарки.

Для средней части зеленой зоны, которая характеризуется умеренной лесистостью и меньшей вовлеченностью лесов в рекреационное использование, необходимо предусматривать:

- соблюдение экологически приемлемых режимов лесопользования;
- формирование на основе лесов, непосредственно примыкающих к городам-спутникам, лесопарков для повышения их устойчивости к возрастающим рекреационным нагрузкам со стороны жителей этих городов.

Для внешней части зеленой зоны, где лесистость сравнительно высокая, а рекреационное использование очаговое, важным является соблюдение экологически приемлемых режимов лесопользования.

Практическая реализация деятельности по охране пригородных лесов должна опираться на соответствующий управленческий механизм. Нормативную основу такого механизма обеспечивает требование о создании вокруг городов зеленых зон, которое закреплено в Законе Республики Беларусь «Об охране окружающей среды» [19]. В статье 65 данного документа указано, что при градостроительном планировании территорий должны предусматриваться зеленые зоны городов, расположенные вокруг них, включающие как земли лесного фонда, так и земли иных категорий.

Понятие зеленой зоны и требования к ее созданию приведены в ЭкоНП 17.01.06.001-2017 «Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности» [20]. Зеленая зона трактуется как установленная в градостроительной документации зона, примыкающая к границам города по его периметру и включающая леса, озелененные территории, выполняющие санитарно-гигиенические, рекреационные, инженерно-технические, культурные эстетические или иные несельскохозяйственные функции.

Размеры зеленой зоны определяются, исходя из норматива обеспеченности городского населения лесной площадью. Для крупнейшего города, каким является Минск, принята величина этого норматива 200 га на 1000 человек. Соответственно, общая площадь лесов, относимых к зеленой зоне города, с учетом численности его населения около 2 млн человек, должна составить примерно 4 тыс. км². Принимая во внимание среднюю лесистость окружающей Минск территории, равной 37 %, границы его зеленой зоны будут распространяться на удаление до 60 км от города.

Ведение лесного хозяйства в лесах, входящих в состав зеленой зоны, должно быть ориентировано в первую очередь на выполнение ими указанных выше эколого-рекреационных функций. Соблюдение подобного требования ранее опиралось на соответствующее нормативное обеспечение, когда выделялась специальная категория лесов – леса 1-й группы. Для этих лесов устанавливался природоохранный режим лесопользования с запретами и ограничениями на ведение в них хозяйственной деятельности. Леса, входившие в зеленую зону, относились к данной категории.

В 2015 г. с принятием новой редакции Лесного кодекса Республики Беларусь категория лесов 1-й группы была упразднена [21]. Вместо нее были установлены аналогичные по природоохранной направленности категории лесов: природоохранные, рекреационно-оздоровительные, защитные.

Леса указанных категорий располагаются и на пригородной территории. В то же время они имеют локальное распространение и составляют лишь небольшую часть зеленой зоны города. Например, категорию рекреационных лесов г. Минска формируют лишь леса, находящиеся на удалении только 5 км от его границы. Остальные входящие в зеленую зону леса относятся, по сути, к категории эксплуатационных. Природоохранный режим на них не распространяется, из-за чего утрачивается сам смысл выделения данной зоны как особого территориального образования, в пределах которого обеспечивается приоритет экологического значения лесов над эксплуатационным.

В сложившихся условиях для соблюдения указанного приоритета, очевидно, нужны иные меры. В качестве такой меры может выступить введение процедуры планирования зеленой зоны вместо простого выделения ее границ. Действующей нормативной документацией подобное планирование не предусмотрено, но, согласно Градостроительному кодексу, оно предполагается для пригородной зоны, исходя из социально-экономических потребностей города.

Соответственно, в проект планировки пригородной зоны в качестве его составной части целесообразно включить планировку зеленой зоны с введением режимов использования лесов, обеспечивающих успешное выполнение ими эколого-рекреационных функций в интересах города. В этом случае

вместо раздельного установления зеленой зоны и планирования пригородной будет разрабатываться единый проект планировки пригородной зоны, содержащий и схему оптимальной пространственной организации лесов.

Указанное планировочное решение должно создать необходимые предпосылки охраны пригородных лесов. Кроме того, совместное планирование этих лесов с планированием социально-экономического развития территории повысит конструктивное значение самого планирования за счет сбалансированного учета социально-экономических и экологических интересов ее развития.

Заключение. Пространственное распределение пригородных лесов Минска в решающей степени определяется организующим влиянием города на природопользование прилегающей к нему территории, которое проявляется в максимальной интенсивности ее хозяйственного освоения в ближнем от городских границ 20-километровом поясе, последовательно снижаясь к периферии. Лесистость территории находится в обратной зависимости от ее хозяйственного освоения, характеризуясь минимальной величиной – 23 % в ближнем поясе и увеличиваясь почти двукратно – 44 % в удаленном поясе (40–60 км).

В современной типологической структуре пригородных лесов преобладают сосняки (57 %), что обеспечивает их высокий оздоровительный эффект и благоприятные предпосылки рекреационного использования.

Эколого-рекреационная значимость лесов пригородной территории является неодинаковой в зависимости от их удаления от города и положения в системе водосборных бассейнов, что создает возможность ее соответствующего ранжирования, согласно которому в пределах данной территории выделены четыре зоны по эффективности выполнения лесами санитарно-гигиенической, водоохранной и рекреационной функций: ближняя, средняя, периферийная и водосборного бассейна Вилейского водохранилища.

Охрана пригородных лесов не может опираться на действовавший ранее управленческий механизм, предполагавший выделение вокруг города зеленой зоны с отнесением входящих в ее состав лесов к 1-й группе лесопользования в связи с упразднением данной их категории. Альтернативным вариантом его замены предлагается переход от формального выделения границ зеленой зоны города к ее планированию в составе проекта планировки пригородной зоны, с установлением режимов лесопользования в соответствии с эколого-рекреационным ранжированием лесов.

Список использованных источников

1. Оптимизация рекреационного лесопользования : [сб. ст.] / АН СССР, Науч. совет по пробл. леса, лаб. лесоведения ; [отв. ред. Л. П. Рысин]. – М. : Наука, 1990. – 119 с.
2. Экологическое состояние пригородных лесов Красноярск / отв. ред. д-р биол. наук, проф. Л. И. Милютин. – Новосибирск : Гео, 2009. – 179 с.
3. Пригородные леса не успевают очищать воздух от городских выбросов / Портал «Научная Россия». – URL: <https://scientificrussia.ru/articles/prigorodnye-lesa-ne-uspevayut-ochishchat-vozduh-ot-gorodskih-vybrosov> (дата обращения: 10.03.2026).
4. Устойчивое городское и пригородное лесное хозяйство : аналитическая записка / Европейская экономическая комиссия ООН. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-03/Urban%20forestry_Policy%20brief_Final_RU_1_0.pdf (дата обращения: 12.03.2026).
5. Струк, М. И. Подходы к планировочной организации природной составляющей пригородной территории / М. И. Струк, С. Г. Живнач // Природопользование : сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Мн., 2011. – Вып. 20. – С. 5–11.
6. Струк, М. И. Территориальная организация земель пригородной зоны Минска / М. И. Струк, С. Г. Живнач // Природопользование : сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Мн., 2017. – Вып. 31. – С. 65–72.
7. Струк М. И. Приоритетные направления перспективного планирования природных экосистем пригородной территории Минска / М. И. Струк, С. Г. Живнач // Природопользование. – 2022. – № 2. – С. 157–170.
8. Струк, М. И. Методические подходы и результаты геоэкологического районирования пригородной территории Минска / М. И. Струк, С. Г. Живнач // Природопользование : сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Мн., 2013. – Вып. 23. – С. 48–55.
9. Преображенский, В. С. Основы ландшафтного анализа / В. С. Преображенский, Т. Д. Александрова, Т. П. Куприянова. – М. : Наука, 1988. – 192 с.
10. Исаченко, А. Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование / А. Г. Исаченко. – М. : Высш. шк., 1991. – 366 с.

11. Городская среда: геоэкологические аспекты / В. С. Хомич, С. В. Какарека, Т. И. Кухарчик, Л. А. Кравчук. – Мн. : Бел. навука, 2013. – 301 с.
12. OpenStreetMap [site]. – URL: <https://www.openstreetmap.org> (date of access: 21.02.2025).
13. Гельтман, В. С. Географический и типологический анализ лесной растительности Белоруссии / В. С. Гельтман. – Мн. : Наука и техника, 1982. – 326 с.
14. Нацыянальны атлас Беларусі. – Мінск, 2002. – 292 с.
15. Мосько, Т. В. Оценка рекреационного потенциала Гомельской области / Т. В. Мосько, М. Г. Ясовеев, Е. А. Гайдаш // Непрерывное географическое образование: новые технологии в системе высшей и средней школы : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 25–26 апр. 2013 г. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: Г. Н. Каропа [и др.]. – Гомель, 2013. – С. 252–255.
16. Экология города / под ред. проф. В. В. Денисова. – М. : MapT ; Ростов н/Д. : MapT, 2008. – 832 с.
17. Список агроусадб в разрезе районов // Минский областной исполнительный комитет. URL: <https://minsk-region.gov.by/app/uploads/sites/3/2024/09/15052016-1.pdf> (дата обращения: 21.02.2026).
18. Санатории Минской области / Санатории Белоруссии с лечением : [сайт]. – URL: <https://sanby.ru/sanatorii-minskoj-oblasti> (дата обращения: 21.02.2026).
19. Об охране окружающей среды : Закон Респ. Беларусь от 26 нояб. 1992 г. № 1982-XII : в ред. от 4 янв. 2022 г. № 145-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19201982> (дата обращения: 10.06.2022).
20. Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности : ЭкоНИП 17.01.06.001-2017 : Утв. постановлением Мин-ва природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 18.07.2017 № 5-Т.
21. Лесной кодекс Республики Беларусь : 24 дек. 2015 г., № 332-З. : принят Палатой представителей 3 дек. 2015 г. : одобр. Советом Республики 9 дек. 2015 г. : в ред. Закона Республики Беларусь от 31.01.2022 г. // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Hk1500332> (дата обращения: 14.10.2025).

References

1. *Optimizaciya rekreacionnogo lesopol'zovaniya*: [Optimization of recreational forest management]. AN SSSR, Nauchnyj soviet po problemam lesa, laboratoriya lesovedeniya [USSR Academy of Sciences, Scientific Council on Forest Problems, Forest Science Laboratory]. [Editor-in-chief L. P. Rysin]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 119 p. (in Russian)
2. *Ekologicheskoe sostoyanie prigorodnyh lesov Krasnoyarska* [Ecological state of suburban forests of Krasnoyarsk]. Editor-in-Chief, Doctor of Biological Sciences, Professor L. I. Milyutin. Novosibirsk, Geo Publ., 2009. 179 p. (in Russian)
3. *Prigorodnye lesa ne uspevayut ochishchat' vozdukh ot gorodskih vybrosov* [Suburban forests are failing to clean the air of urban emissions. Portal "Nauchnaya Rossiya" [Scientific Russia portal]. URL: <https://scientificrussia.ru/articles/prigorodnye-lesa-ne-uspevayut-ochishchat-vozdukh-ot-gorodskih-vybrosov> (accessed March 10, 2026). (in Russian)
4. *Ustojchivoe gorodskoe i prigorodnoe lesnoe hozyajstvo: analiticheskaya zapiska* [Sustainable Urban and Peri-Urban Forestry: Policy Brief]. *Evropejskaya ekonomicheskaya komissiya OON* [United Nations Economic Commission for Europe]. URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-03/Urban%20forestry_Policy%20brief_Final_RU_1_0.pdf (accessed March 12, 2026). (in Russian)
5. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Podhody k planirovochnoj organizacii prirodnoj sostavlyayushchej prigorodnoj territorii* [Approaches to the planning organization of the natural component of a suburban area]. *Prirodopolzovanie = Nature Management*, Minsk, 2011, iss. 20, pp. 5–11. (in Russian)
6. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Territorial'naya organizaciya zemel' prigorodnoj zony Minska* [Territorial organization of lands in the suburban area of Minsk]. *Prirodopolzovanie = Nature Management*, Minsk, 2017, iss. 31, pp. 65–72. (in Russian)
7. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Prioritetnye napravleniya perspektivnogo planirovaniya prirodnyh ekosistem prigorodnoj territorii Minska* [Priority areas of long-term planning of natural ecosystems in the suburban area of Minsk]. *Prirodopolzovanie = Nature Management*, Minsk, 2012, iss. 2, pp. 157–170. (in Russian)
8. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Metodicheskie podhody i rezul'taty geoekologicheskogo rajonirovaniya prigorodnoj territorii Minska* [Methodological approaches and results of geoecological zoning of the suburban area of Minsk]. *Prirodopolzovanie = Nature Management*, Minsk, 2013, iss. 23, pp. 48–55. (in Russian)
9. Preobrazhenskij V. S., Aleksandrova T. D., Kupriyanova T. P. *Osnovy landshaftnogo analiza* [Basics of landscape analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 192 p. (in Russian)
10. Isachenko A. G. *Landshaftovedenie i fiziko-geograficheskoe rajonirovanie* [Landscape science and physical-geographical zoning]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1991, 366 p. (in Russian)

11. Khomich V. S., Kakareka S. V., Kukharchik T. I., Kravchuk L. A. *Gorodskaya sreda: geoekologicheskie aspekty* [Urban environment: geoecological aspects]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2013, 301 p. (in Russian)
12. OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org>. (accessed February 21, 2026). (in Russian)
13. Gel'tman V. S. *Geograficheskij i tipologicheskij analiz lesnoj rastitel'nosti Belorussii* [Geographical and typological analysis of forest vegetation of Belarus]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1982, 326 p. (in Russian)
14. *Nacyyanal'ny atlas Belarusi* [National Atlas of Belarus]. Minsk, 2002, 292 p. (in Russian)
15. Mos'ko T. V., Yasoveev M. G., Gajdash E. A. *Ocenka rekreacionnogo potenciala Gomel'skoj oblasti* [Assessment of the Recreational Potential of the Gomel Region]. *Nepreryvnoe geograficheskoe obrazovanie: novye tekhnologii v sisteme vysshej i srednej shkoly : materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Gomel', 25–26 aprelya 2013 g.* [Continuous geographical education: new technologies in the system of higher and secondary education: Proceedings of the IV International scientific and practical conference, Gomel, April 25–26, 2013]. Gomel', 2013, pp. 252–255. (in Russian)
16. *Ekologiya goroda* [Urban ecology]. Pod red. prof. V. V. Denisova. Moscow, MarT Publ.; Rostov on Don, MarT Publ., 2008, 832 p. (in Russian)
17. *Spisok agrousadeb v razreze rajonov* [List of agro-estates by district]. *Minskij oblastnoj ispolnitel'nyj komitet* [Minsk Regional Executive Committee]. URL: <https://minsk-region.gov.by/app/uploads/sites/3/2024/09/15052016-1.pdf> (accessed February 21, 2026). (in Russian)
18. *Sanatorii Minskoj oblasti* [Sanatoriums of the Minsk Region]. *Sanatorii Belorussii s lecheniem: [sajt]* [Belarusian Sanatoriums with Treatment: Official website]. URL: <https://sanby.ru/sanatorii-minskoj-oblasti> (accessed February 21, 2026). (in Russian)
19. *Ob ohrane okruzhayushchej sredy : Zakon Respubliki Belarus ot 26 noyabrya 1992 g. № 1982-XII: v redakcii ot 4 yanvarya 2022 g. № 145-Z* [On Environmental Protection: Law of the Republic of Belarus dated November 26, 1992 No. 1982-XII: as amended on January 4, 2022 No. 145-3]. *Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'* [National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus]. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19201982> (accessed 5 February 2026). (in Russian)
20. EkoNiP 17.01.06.001-2017 “*Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodnopol'zovanie. Trebovaniya ekologicheskoy bezopasnosti*” [EcoNiP 17.01.06.001-2017 “Environmental Protection and Nature Management. Environmental Safety Requirements”]. Uтверждены постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 18.07.2017 № 5-Т [Approved by the Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus dated July 18, 2017 No. 5-T]. URL: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2023/03/3-новая-редакция-ЭкоНиП-17.01.06-001-2017.pdf> (accessed February 5, 2026). (in Russian)
21. *Lesnoj kodeks Respubliki Belarus'*: 24 dekabrya 2015 g., № 332-Z. : prinyat Palatoj predstavitelej 3 dekabrya 2015 g. : odobren Sovetom Respubliki 9 dekabrya 2015 g. : v redakcii Zakona Respubliki Belarus' ot 31.01.2022 g. [Forest Code of the Republic of Belarus: December 24, 2015, No. 332-Z: adopted by the House of Representatives on December 3, 2015: approved by the Council of the Republic on December 9, 2015: as amended by the Law of the Republic of Belarus of January 31, 2022]. *Nacional'nyj pravovoj Internet-portal Respubliki Belarus'* [National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus]. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Hk1500332> (accessed February 5, 2026). (in Russian)

Информация об авторах

Струк Михаил Игоревич – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Struk-17@mail.ru

Живнач Светлана Геннадьевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: zhyunach@gmail.com

Information about the authors

Mikhail I. Struk – Ph. D. (Geography), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Struk-17@mail.ru

Svetlana G. Zhivnach – Ph. D. (Geography), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhyunach@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-132-147>
УДК 551.568

Поступила в редакцию 11.05.2026
Received 11.05.2026

БИОКЛИМАТИЧЕСКАЯ КОМФОРТНОСТЬ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ БЕЛАРУСИ

О. Ю. Круковская, С. В. Алисиевич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты оценки биоклиматической комфортности урбанизированных территорий Беларуси с использованием индекса UTCI. Для периода 2023–2025 гг. для всех городских населенных пунктов на основе данных реанализа и моделирования параметров подстилающей поверхности (фактор видимости неба, шероховатость) выявлены закономерности трансформации термического режима по сравнению с фоновыми условиями метеоплощадок. Установлено, что пространственное распределение индекса подчинено географической зональности (возрастание с северо-востока на юго-запад), которая нарушается в пределах городов под влиянием структуры землепользования. Показано превалирование комфортных условий (41,0 % времени) и отсутствие экстремальных категорий стресса в среднем в течение года, представлена внутригодовая динамика структуры термического стресса. Выявлено, что городская застройка повышает значения UTCI в среднем на 1,3...3,4 °C и увеличивает продолжительность комфортных условий на 5,7 п. п., а также приводит к модуляции экстремального термического стресса. Впервые показано, что для умеренного климата Беларуси в настоящее время морфология городов влияет на частоту и длительность волн тепла в летний период. Результаты работы демонстрируют специфику влияния урбанизации в умеренных широтах и могут быть использованы при планировании городской среды.

Ключевые слова: биоклиматическая комфортность; универсальный термический климатический индекс (UTCI); локальные климатические зоны (LCZ); городской микроклимат; тепловой комфорт; урбанизированные территории; волны тепла.

Для цитирования. Круковская О. Ю., Алисиевич С. В. Биоклиматическая комфортность урбанизированных территорий Беларуси // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 132–147.

BIOCLIMATIC COMFORT OF URBANIZED TERRITORIES IN BELARUS

O. Yu. Krukowskaya, S. U. Alisiyevich

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The results of the bioclimatic comfort assessment of urbanized areas in Belarus using the Universal Thermal Climate Index (UTCI) are presented. For the period 2023–2025, patterns of thermal regime transformation in all urban settlements were identified by comparing them with background meteorological station conditions, based on reanalysis data and modeling of surface parameters (sky view factor, roughness). It was established that the spatial distribution of the index follows geographical zonality (increasing from northeast to southwest), which is disrupted within cities under the influence of land-use patterns. The study demonstrates a prevalence of comfortable conditions (41.0 % of the time) and the absence of extreme stress categories on an annual average; the intra-annual dynamics of the thermal stress structure are also presented. It was revealed that urban development increases UTCI values by an average of 1.3...3.4 °C, which extends the duration of comfortable conditions by 5.7 p. p. Furthermore, a modulation effect on extreme thermal stress was observed. For the first time, it is shown that in the temperate climate of Belarus, urban morphology currently affects the frequency and duration of heat waves during the summer period. The results demonstrate the specific impact of urbanization in temperate latitudes and can be utilized in urban environment planning.

Keywords: bioclimatic comfort; Universal Thermal Climate Index (UTCI); local climate zones (LCZ); urban microclimate; thermal comfort; urbanized areas; heat waves.

For citation. Krukowskaya O. Yu., Alisiyevich S. U. Bioclimatic comfort of urbanized territories in Belarus. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 132–147.

Введение. Согласно данным наблюдений [1], с 1980-х годов отмечается выраженное потепление климата; десятилетие 2011–2020 гг. стало самым теплым за всю историю наблюдений. Сходная динамика отмечается и для Беларуси. При этом климатические условия и их изменения оказывают влияние не только на хозяйственную деятельность, но и на самочувствие и здоровье человека.

Биоклиматическая комфортность представляет собой состояние внешней среды, при котором под действием совокупности метеорологических факторов обеспечивается оптимальное тепловое состояние организма человека, механизмы терморегуляции испытывают минимальное напряжение. К настоящему моменту выполнено большое количество исследований, направленных на определение степени комфортности различных метеорологических условий для человека в открытой среде и градацию термических ощущений. Следствием таких исследований стало большое количество разработанных биоклиматических индексов. В метааналитической работе [1] в результате анализа 110 рецензируемых статей, опубликованных в 2001–2017 гг., приведен системный обзор 56 таких индексов. Показано, что наибольшее распространение получили индексы PMV, PET, UTCI, а другие используются значительно реже.

Универсальный термический климатический индекс (UTCI) разработан междисциплинарной группой экспертов из 23 стран в рамках проекта COST Action 730 и одобрен Международным обществом биометеорологии ISB [2]. Расчет индекса UTCI основан на модели теплообмена человека с окружающей средой (термофизиологической модели «Fiala») [3], которая рассматривает тело человека как сложную систему сегментов и узлов, восприимчивых к внешнему воздействию, с учетом как пассивной (теплофизические процессы теплообмена на поверхности кожи и внутри тканей), так и активной (нейрофизиологические реакции терморегуляции, такие как дрожь, потоотделение и изменение интенсивности кровотока) составляющих. Данный индекс рекомендован Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) как стандартный индекс для оценки теплового воздействия на население [4].

В Беларуси к настоящему моменту наиболее представлены два подхода оценки комфортности климата. Первый подход основан на распространенных международных индексах – эффективной температуре (TE) (температурно-влажностный), эквивалентно-эффективной температуре (ЭЭТ) (температурно-влажностно-ветровой), а также биоклиматическом индексе теплосодержания воздуха (БИТ), или энтальпии (i) (теплоощущения), и нашел свое отражение в работах В. Ф. Логинова с соавторами [5, 6]. Значения эффективной температуры, ЭЭТ и БИТ рассчитаны для всех доступных метеоданных для периода с 1966 по 2020 г., выполнена пространственная интерполяция для полного покрытия территории Беларуси. Показано устойчивое повышение биоклиматических индексов комфортности на протяжении рассматриваемого периода, связанное с активной фазой потепления климата. При этом рост индексов также связан со снижением средней скорости ветра и изменением испаряемости, обусловленным ростом температуры. Выполнен расчет индекса суровости погоды.

Второй подход к оценке комфортности разработан А. Н. Витченко и предполагает расчет комплексного весового интегрального бального показателя комфортности [7]. Показатель основан на учете показателей: сезонных летних (продолжительность комфортного периода, количество душных дней, средняя температура июля), зимних (средняя температура января, продолжительность дискомфорта, количество холодных дней) и круглогодичных (осадки, изменение погоды, период комфортной эксплуатации жилых помещений, метеорологический потенциал самоочищения атмосферы). Исходные данные для оценки – среднесуточная метеорологическая информация. Данная комплексная оценка, в отличие от индексной оценки, является вероятностной и целесообразной для года в целом, тогда как вышеуказанные показатели позволяют характеризовать условия в конкретный момент времени.

Цель работы – выполнить расчет показателя UTCI для всех урбанизированных территорий Беларуси с учетом организации городского пространства и на его основе определить климатический потенциал городов и городских поселков Беларуси, проанализировать его пространственную вариативность.

Исходные данные и методы исследования. Оценка климатического потенциала урбанизированных территорий основана на индексе климатической комфортности UTCI, преобразующем стандартные метеорологические данные в показатели теплового самочувствия человека на уровне пешехода в условиях реальной городской застройки. Для расчета использован оригинальный программный комплекс Bioklima 2.6.

Формула определения индекса UTCI:

$$UTCI = T_a + \Delta Offset(T_a, \Delta T, V, e_a), \quad (1)$$

где T_a – температура атмосферного воздуха (метеорологическая); $\Delta T = T_{mrt} - T_a$ – радиационная нагрузка как разница между радиационной и воздушной температурой; V – скорость ветра (на уровне 1,1 м); e_a – давление водяного пара.

Входными метеорологическими показателями при этом являются температура атмосферного воздуха T_a , радиационная температура T_{mrt} , скорость ветра на уровне 10 м $V_{10\text{ м}}$ и относительная влажность воздуха f .

Для целей данной работы расчет выполнен с учетом изменения входных параметров модели на урбанизированных территориях (притенения и отражения зданий и зеленых насаждений, шероховатость и альbedo поверхностей), что позволяет оценить реальную физиологическую нагрузку для населения. Условия урбанизированных территорий и локального микроклимата учтены посредством предварительного расчета указанных показателей. Значение радиационной температуры вычислено упрощенным полуэмпирическим методом, адаптированным для городской застройки с использованием радиационной поправки к температуре атмосферного воздуха отдельно для ночных и дневных условий. Теоретический передел доступной солнечной энергии и разделение расчетного времени суток установлены исходя из положения солнца для каждого расчетного срока и точек, соответствующих геометрическим центрам исследуемых населенных пунктов.

Дневное радиационное изменение температуры рассчитано по формуле согласно [8] с учетом поправок [9]:

$$dTr^d = (0,308 \cdot (S_{glob_{est}} (1 - alb_{city}) \cdot svf_{dynamic})) / 6, \quad (2)$$

где $S_{glob_{est}}$ – максимальное значение поступающей солнечной радиации с учетом даты, времени и облачности, Вт/м²; alb_{city} – средневзвешенное значение альbedo для населенного пункта с учетом структуры землепользования и осредненных значений показателя для различных локальных климатических зон; $svf_{dynamic}$ – динамическое средневзвешенное значение фактора видимого неба для населенного пункта с учетом структуры землепользования, растительности, сезона и осредненных значений показателя для различных локальных климатических зон.

Ночное радиационное изменение температуры (радиационное выхолаживание) определено исходя из облачности cl и фактора видимого неба методом упрощенной линеаризации радиационного баланса по Клаусу [8, 10, 11]:

$$dTr^n = -4 \cdot (1 - cl / 8) \cdot svf_{dynamic}, \quad (3)$$

Подаваемое в расчет значение скорости ветра на урбанизированных территориях скорректировано с учетом шероховатости поверхности z_0 с использованием нижнего порога ограничения 0,5 м/с для корректного расчета [2].

Значение динамического $svf_{dynamic}$ получено путем корректировки базового значения svf в зависимости от сезона и доли озелененных территорий.

Для выполнения расчета для всех городских населенных пунктов (городов, поселков городского типа, рабочих и курортных поселков, далее – городов) Беларуси в качестве исходных использованы данные метеорологического реанализа ERA5 с учетом поправки скорости ветра [12]. Расчет выполнен для четырех сроков в сутки – 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 часов – для периода с 2023 по 2025 г., выбранного для репрезентации современных условий со сглаживанием за трехлетний период.

Учет структуры землепользования в городах проведен на основании локальных климатических зон (LCZ) [13]. Значения площадей зон для населенных пунктов вычислены посредством обработки данных «Global map of Local Climate Zones» [14] по административным границам, установленным в Публичной кадастровой карте. С учетом площадей зон в пределах городов и их характеристик получены средневзвешенные значения альbedo, шероховатости поверхности и базового значения фактора видимости неба svf . Базовые значения характеристик локальных климатических зон, использованные в расчете согласно работе [13] и подтвержденные в работах [15, 16], представлены в табл. 1.

Для оценки влияния индивидуальной структуры землепользования каждого города для всех проанализированных сроков выполнен расчет значения индекса UTCI, который можно ожидать на метеоплощадке при таких значениях метеорологических параметров, – фонового метеорологического значения $UTCI_i^{bg}$. Для условной метеорологической площадки приняты стандартная шероховатость для открытой травы $z_0_{bg} = 0,01$, альbedo травы $alb_{bg} = 0,22$ и фактор видимости неба открытого небосвода $svf_{bg} = 0,98$. Рассчитано изменение индекса UTCI в среднем для города относительно фонового значения:

$$UTCI_i^d = UTCI_i - UTCI_i^{bg}. \quad (4)$$

Для оценки интерпретации полученных результатов выделены категории термического стресса (табл. 2), определена среднегодовая продолжительность периодов разного уровня: доля времени (%) и число дней, когда наблюдались различные уровни термического стресса.

Таблица 1. Характеристики зон LCZ, использованные в расчете**Table 1. Characteristics of LCZ zones used in the calculation**

Код LCZ	Зона	Базовое значение фактора видимости неба svf	Альбе́до	Шероховатость поверхности z_0
LCZ 1	Плотная высотная (Compact high-rise)	0,30	0,15	0,850
LCZ 2	Плотная среднеэтажная (Compact mid-rise)	0,45	0,18	0,700
LCZ 3	Плотная малоэтажная (Compact low-rise)	0,40	0,20	0,500
LCZ 4	Разомкнутая высотная (Open high-rise)	0,60	0,18	0,450
LCZ 5	Разомкнутая среднеэтажная (Open mid-rise)	0,65	0,20	0,350
LCZ 6	Разомкнутая малоэтажная (Open low-rise)	0,75	0,22	0,300
LCZ 7	Малоэтажная застройка из легких материалов (Lightweight low-rise)	0,35	0,15	0,400
LCZ 8	Крупногабаритная низкая (Large low-rise)	0,85	0,12	0,250
LCZ 9	Разреженная застройка (Sparsely built)	0,85	0,25	0,150
LCZ 10	Тяжелая промышленность (Heavy industry)	0,75	0,15	0,400
LCZ A	Плотный лес (Dense trees)	0,20	0,18	0,800
LCZ B	Редколесье (Scattered trees)	0,65	0,20	0,400
LCZ C	Кустарники (Bush, scrub)	0,80	0,22	0,200
LCZ D	Низкая растительность (Low plants)	0,95	0,22	0,050
LCZ E	Голая почва/песок (Bare soil/sand)	0,95	0,20	0,010
LCZ F	Плотная запечатанная почва (Bare paved)	0,95	0,18	0,005
LCZ G	Вода (Water)	0,98	0,07	0,001

Таблица 2. Стандартная шкала термического стресса UTCI [17, 18]**Table 2. Standard UTCI thermal stress scale [17, 18]**

Диапазон UTCI, °C	Категория (уровень) термического стресса	Физиологическая интерпретация
Выше +46	Экстремальный тепловой стресс	Критический риск теплового удара
+38...+46	Очень сильный тепловой стресс	Сильное напряжение системы терморегуляции
+32...+38	Сильный тепловой стресс	Ощутимый дискомфорт, перегрев
+26...+32	Умеренный тепловой стресс	Начало дискомфорта, потоотделение
+9...+26	Отсутствие термического стресса	Зона биоклиматического комфорта
0...+9	Слабый холодовой стресс	Легкое ощущение прохлады
-13...0	Умеренный холодовой стресс	Сужение сосудов, метаболическая адаптация
-27...-13	Сильный холодовой стресс	Дрожь, риск обморожения при длительном пребывании
-40...-27	Очень сильный холодовой стресс	Высокий риск гипотермии
Ниже -40	Экстремальный холодовой стресс	Опасность для жизни при кратком пребывании

Для определения зависимости размещения урбанизированных территорий от характерного для них значения индекса выполнен пространственный анализ распределения величины показателя. Для анализа применен инструмент «Пространственная автокорреляция» в программной среде ESRI ArcGIS, использующий статистический показатель Global Moran's I.

Далее для выявления и визуализации кластеризации распределения значений проведен анализ статистически значимых горячих и холодных точек и пространственных выбросов на основе показателя Anselin Local Moran's I (инструмент «Оптимизированный анализ выбросов»).

Выполнен расчет продолжительности «волн тепла» (heatwaves) как числа дней с сильным тепловым стрессом в полуденные часы на протяжении трех дней последовательно (по критерию ВОЗ, как периодов с доказанными негативными последствиями для здоровья населения [4]). Использованы установленные в работе [19] критерии волн тепла (heatwaves) по показателю UTCI.

Результаты и их обсуждение. Согласно полученным результатам, разовые значения UTCI за исследуемый период в городах Беларуси находились в диапазоне $-31.0...+42.2$ °C, медианное значение составило $+8.4$ °C (рис. 1). Максимумы расчетных значений индекса наблюдаются около $0...+5$ °C и $+17...+19$ °C. Межгодовые различия в распределении выражены слабо, несколько более высоким диапазоном значений, а также смещением первого максимума (около 5 °C) в область более высоких значений отличается 2025 г.

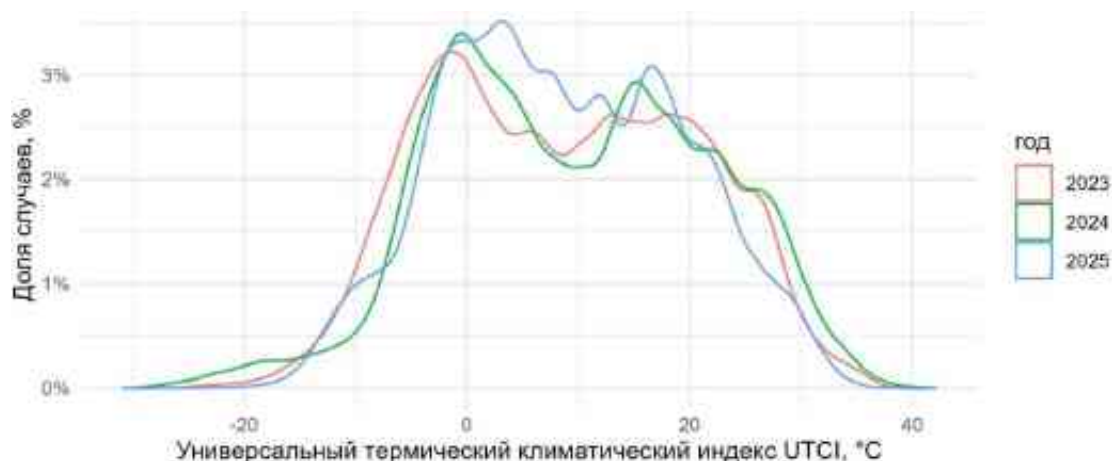


Рис. 1. Гистограмма распределения разовых значений индекса UTCI в городах Беларуси

Fig. 1. Histogram of the distribution of single UTCI values in cities of Belarus

Внутригодовое распределение разовых значений UTCI в городах Беларуси за рассматриваемый период демонстрирует ожидаемую выраженную сезонность. Среднее значение увеличивается от $-4,8$ °C в январе до $+3,3$ °C в марте и $+15,0$ °C в мае, достигая максимума в июле в размере $+22,4$ °C, в дальнейшем сокращаясь до $+17,0$ °C в сентябре и $-2,8$ °C в декабре (табл. 3). Средние значения UTCI выше, чем средние значения температуры атмосферного воздуха с апреля по сентябрь (на $0,7-2,5$ °C), в остальные месяцы – ниже (на $0,3-3,3$ °C). Причем различие значений месячного осреднения характеризуется выраженным внутригодовым ходом с минимумом в январе и максимумом в июле.

Таблица 3. Статистические характеристик распределения разовых значений UTCI в городах Беларуси по месяцам

Table 3. Statistical characteristics of the distribution of single UTCI values in cities of Belarus by month

Параметр / Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Число разовых значений	74 400	68 000	74 400	72 000	74 400	72 000	74 400	74 400	72 000	74 400	72 000	74 400
Среднее арифметическое значение	-4,8	-3,3	3,3	10,1	15	19,9	22,4	21,1	17	7,4	1,1	-2,8
Стандартное отклонение	7	5,7	6,8	7,9	7,6	6,4	5,8	6,3	6,4	5,2	5,7	4,8
Медиана	-3,4	-3,4	2,8	9,9	15,2	20,1	22,4	20,8	16,4	7,1	1,4	-2,4
Усеченное среднее (10 %)	-4,2	-3,4	3,1	10,1	15	19,9	22,4	20,9	16,9	7,3	1,3	-2,7
Медианное абсолютное отклонение	5,6	5,5	6,5	7,7	8,3	6,7	6,1	6,4	5,5	5,2	5,5	4,6
Минимум	-31,0	-26,1	-23	-14,9	-5,4	0,2	3,1	4,8	-3,8	-8,9	-21	-19,7
Максимум	15,5	18,6	28,9	31,8	33	37,5	42,2	38,7	34,6	26	18,2	13,6
Размах	46,5	44,7	51,9	46,7	38,4	37,3	39,1	33,9	38,4	34,9	39,2	33,3
Асимметрия	-0,8	0,1	0,4	0	-0,1	-0,1	0	0,2	0,1	0,3	-0,3	-0,3
Экссесс	0,5	0,2	0,1	-0,1	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,2	-0,1	0,3	-0,1

Обращает на себя внимание широкий размах разовых значений UTCI, как правило более широкий в зимние и весенние месяцы. В частности, в январе значение UTCI находилось в диапазоне от $-31,0$ до $+15,5$ °C. Высокие положительные значения в отдельные дни отмечены на юге Беларуси. Например, одно из наиболее высоких значений индекса в зимний период наблюдалось в Малорите 28 февраля 2024 г. при слабом ветре, температуре атмосферного воздуха $+13,4$ °C и в отсутствие облачности.

Величина среднемесячного размаха наибольшая в январе, апреле и марте, характеризуется тенденцией к сокращению до летнего минимума в августе. Вариативность, выраженная показателем стандартного отклонения, наибольшая в весенние месяцы (до 7,9 в мае), наименьшая – в декабре (4,8).

С учетом шкалы теплового стресса (см. табл. 2), суммарно для городов Беларуси характерно следующее распределение условий термического стресса: условия комфорта (отсутствия теплового стресса) наблюдаются 41,0 % времени, легкого холодового стресса – 25,4, умеренного холодового стресса – 24,1, умеренного теплового стресса – 6,6, сильного теплового стресса – 1,0, сильного холодового стресса – 1,8, очень сильного теплового стресса и очень сильного холодового стресса – по 0,05 %. Во внутригодовом ходе присутствует выраженная динамика. Условия термического комфорта в разных соотношениях наблюдаются во все месяцы года: минимально – в зимние месяцы (0,3–1,9 % времени), максимально – в сентябре и июне (78,8 и 78,0 % соответственно). В зимние месяцы формируется дискомфорт отрицательных температур, а летние – положительных. Условия очень сильного холодового стресса наблюдаются только в январе, сильного холодового стресса – в ноябре – декабре и январе – марте (максимум в январе), сильного теплового – с мая по сентябрь (максимум в августе), очень сильного – в июле и августе. Случаи условий экстремального теплового и холодового стресса в рассматриваемый период в городах Беларуси не выявлены (рис. 2).

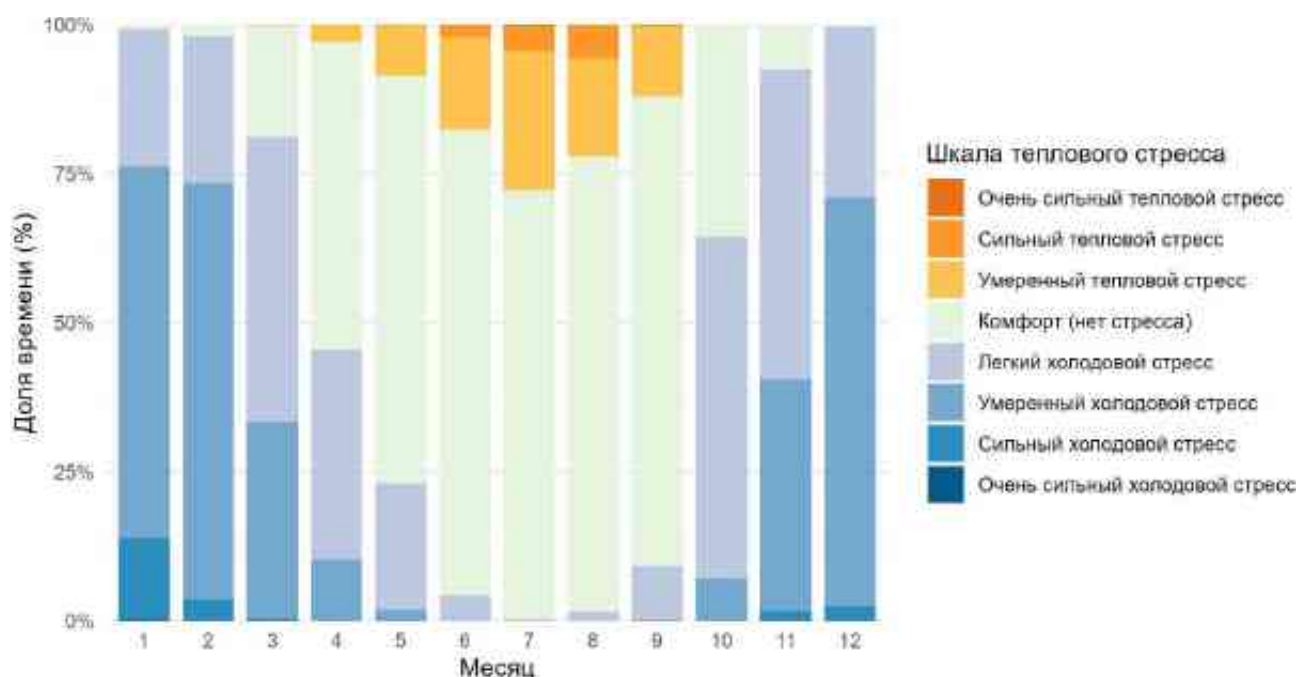


Рис. 2. Структура термического стресса UTCI по месяцам

Fig. 2. UTCI thermal stress structure by month

Биоклиматическая комфортность отдельных городов. Условия термического комфорта характеризуются выраженной не только внутригодовой, но и пространственной вариативностью. Среднегодовое значение индекса UTCI в городах Беларуси находится в диапазоне от $+7,5$ до $+11,0$ °C (рис. 3, а). Значения показателя имеют выраженную пространственную структуру, с закономерным преобладающим ростом в меридиональном направлении: для городов, расположенных южнее 53° с. ш., UTCI составляет в среднем $+9,6$ °C, между 53° и 55° с. ш. – $+8,6$ °C, севернее 55° с. ш. – $+8,3$ °C. Апостериорные сравнения с использованием критерия Тьюки (Tukey HSD) показали значимые различия между средними значениями для групп ($p < 0,001$).

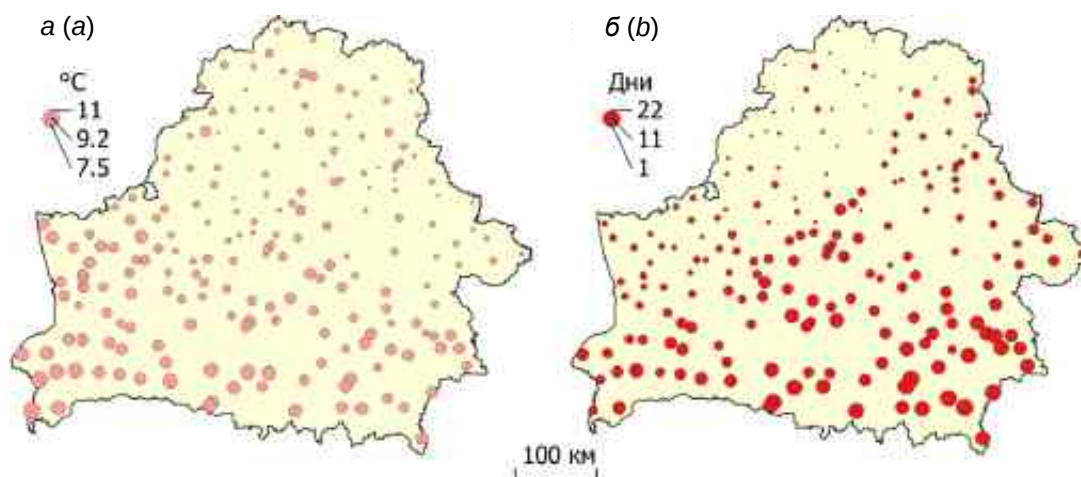


Рис. 3. Показатели термического комфорта в городах Беларуси:
а – среднегодовое значение индекса UTCI, °C; б – общая продолжительность волн тепла, дни

Fig. 3. Thermal comfort indicators in cities of Belarus:
a – mean annual UTCI value, °C; b – total duration of heat waves, days

Пространственный анализ средних значений индекса UTCI для городов показал высокий уровень кластеризации значений (индекс Морана 0,636) с вероятностью случайного пространственного распределения менее 1 %. Следовательно, нулевая гипотеза о случайности распределения может быть отброшена и сделан вывод о закономерности пространственного распределения населенных пунктов в зависимости от величины индекса.

По результатам выявления статистически значимых горячих и холодных точек и пространственных выбросов, рассматриваемые населенные пункты группируются по показателю UTCI следующим образом: кластер высоких значений занимает юго-западную и южную часть Беларуси; средних – центральную; северная – северо-восточная часть характеризуется низкими значениями индекса, за исключением нескольких городов со средними значениями. К кластеру высоких значений отнесены 48 населенных пунктов, расположенных в Брестской, Гомельской и Гродненской областях; к кластеру низких значений – 69 населенных пунктов в Витебской, Минской, Могилёвской и Гродненской областях. По результатам выполненного анализа г. Минск отнесен к кластеру низких значений. Показатели значительной части городов характеризуются промежуточными значениями, не позволяющими отнести их к группе (кластеру) горячих и холодных точек. Среднее значение UTCI для кластера высоких значений (группы горячих точек) достигает +9,8 °C, диапазон – +9,1...+11,0 °C, кластера низких значений (группы холодных точек) – +8,2 °C, диапазон – +7,5...+8,9 °C. Наблюдается рост показателя с северо-востока на юго-запад, что в целом соответствует характерной зональности климата для территории Беларуси. Аналогично разделению по широтным границам (51°, 53°, 55° с. ш.) для выделенных кластеров подтверждено статистически достоверное различие средних значений UTCI по результатам теста Тьюки. Таким образом, распределение городов по величине индекса UTCI подчиняется географической зональности (рис. 4).

При этом, исходя из основных задач используемых методов анализа, выделяется несколько пространственных выбросов значений – населенных пунктов, которые характеризуются статистически значимым отличием показателя от наблюдаемой закономерности распределения (z -оценка менее –1,96, доверительный интервал 95 %): в кластере низких значений – к. п. Нарочь ($z = -2,7$), в кластере высоких значений – Порозово ($z = -2,7$), Василевичи ($z = -2,6$), Коссово ($z = -2,3$), Озаричи ($z = -2,2$). Данное отличие может свидетельствовать о сильном влиянии на значение индекса особенностей структуры этих урбанизированных территорий, которое превалирует над влиянием географической зональности.

Помимо выделенных пространственных выбросов обращает на себя внимание также то, что выявленные кластеры – группы горячих и холодных точек – охватывают не всю область высоких и низких значений соответственно, а учитывают в силу методики взаимное пространственное расположение населенных пунктов и соответствующих им значений показателей. В частности, 11 городов Витебской области (Лынтупы, Бешенковичи, Освея, Езерище, Россоны, Шумилино, Ветрино, Оболь, Верхнедвинск, Полоцк, Новополоцк), расположенные на север от кластера низких значений, характеризуются среднегодовыми значениями UTCI от 8,1 до 9,2. Следовательно, проведенный анализ показал наличие зональности и для детального ее описания по производным показателям целесообразно использовать указанную выше широтную группировку городов.

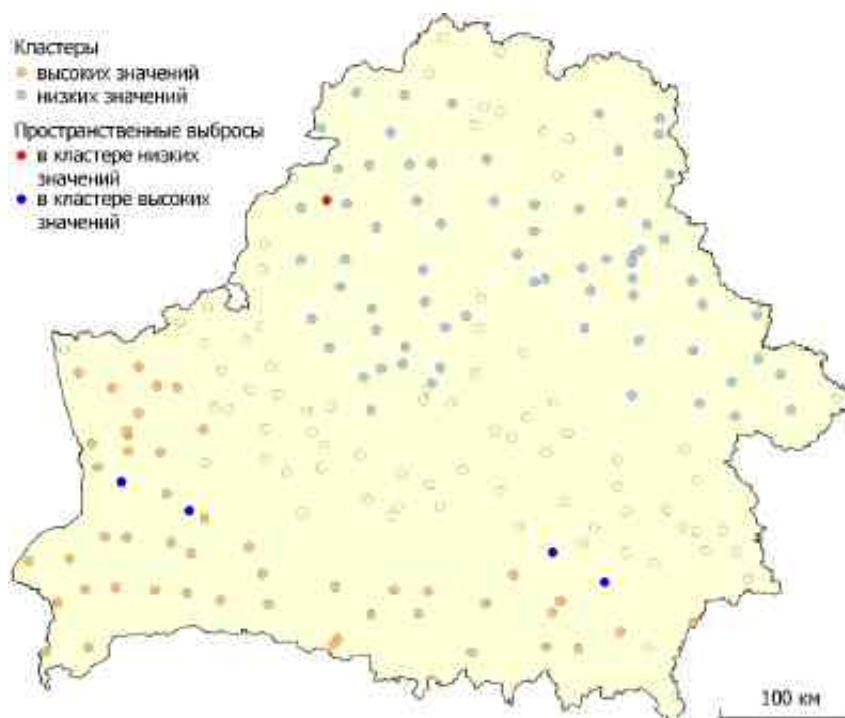


Рис. 4. Распределение городских населенных пунктов Беларуси по кластерам по среднегодовому значению UTCI

Fig. 4. Distribution of urban settlements in Belarus by clusters based on the mean annual UTCI value

Суммарно за год в отдельных городах Беларуси длительность комфортных условий (отсутствие термического стресса) находится в диапазоне от 37,7 до 46,7 %, умеренного теплового стресса – от 3,1 до 8,3, сильного теплового стресса – от 0,1 до 1,9, очень сильного теплового стресса – от 0,02 до 0,21, легкого холодного стресса – от 22,3 до 32,6, умеренного холодного стресса – от 15,1 до 28,4, сильного холодного стресса – от 0,3 до 3,8, очень сильного холодного стресса – от 0,02 до 0,09 % (среднее 0,05 %).

Число дней в году, в течение которых метеорологические условия лежат в границах диапазона комфорта, в городах составляет от 218 до 259 дней и преимущественно также возрастает в меридиональном направлении с севера на юг. Для городов, расположенных южнее 53° с. ш., комфортные условия отмечаются в среднем для 241 дня (от 228 до 259 дней), между 53° и 55° с. ш. – для 231 (от 219 до 245 дней), севернее 55° с. ш. – для 224 дней (от 218 до 228 дней). Города, расположенные южнее 53° с. ш., отличаются относительно меньшим числом дней с условиями холодного стресса и сильнее выраженное большее число дней с условиями теплового стресса, т. е. более контрастные условия по климатической комфортности.

Города с наибольшим числом (250 и более) дней в условиях биоклиматического комфорта – Брест, Домачево, Малорита, Высокое, Жабинка, Кобрин, Пинск – расположены в Брестской области. В то же время города с наименьшим числом (220 и менее) дней с комфортными биоклиматическими условиями находятся в Витебской и Могилёвской областях – Сураж, Копысь, Коханово, Мстиславль, Дрибин, Шарковщина, Круглое.

Условия очень сильного холодного стресса наблюдались за рассматриваемый период для 39,5 % урбанизированных территорий (79 городов из 200), причем для большей части из них (76 городов) и всех из них по 1–2 дня в отдельные годы. В среднем 3 дня в условиях очень сильного холодного стресса характерны для трех городов в Гомельской области, таких как Уваровичи, Стрешин и Озаричи (рис. 5, а). Пространственная структура числа дней в условиях очень сильного холодного стресса выражена менее однородно, чем для числа дней комфортных условий. С одной стороны, число городов, где встречается очень сильный холодный стресс, убывает в меридиональном направлении: из общего числа городов, где отмечается очень сильный холодный стресс, 26 расположены севернее 55° с. ш., 35 – между 53 и 55° с. ш., 18 – южнее 55° с. ш. С другой стороны, города с наибольшей продолжительностью очень сильного холодного стресса находятся на юго-востоке страны. Это подчеркивает многофакторность формирования биоклиматического комфорта на урбанизированных территориях.

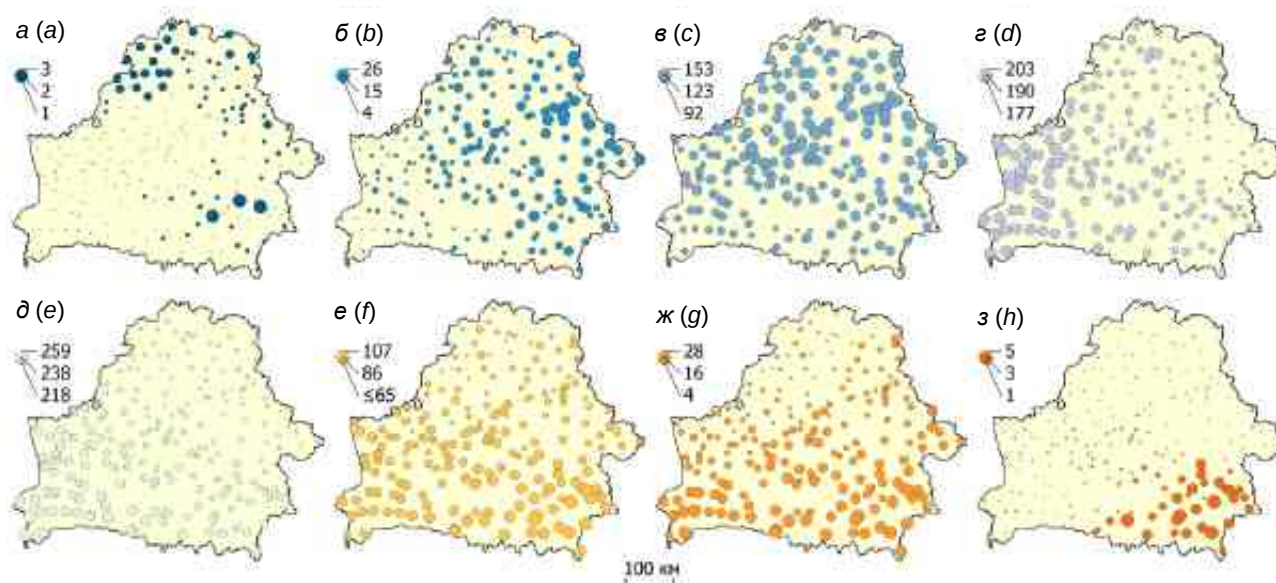


Рис. 5. Среднее число дней с различными категориями термического стресса в городах Беларуси:
а – очень сильного холодного; **б** – сильного холодного; **в** – умеренного холодного;
г – легкого холодного; **д** – отсутствия стресса; **е** – умеренного теплового;
ж – сильного теплового; **з** – очень сильного теплового

Fig. 5. Mean number of days with different thermal stress categories in cities of Belarus:
a – very strong cold stress; **b** – strong cold stress; **c** – moderate cold stress; **d** – slight cold stress;
e – no thermal stress; **f** – moderate heat stress; **g** – strong heat stress; **h** – very strong heat stress

Среди городов, где разово отмечаются условия очень сильного холодного стресса, крупнейшими являются Витебск, Орша, Новополоцк, Полоцк и суммарно проживает 1129,3 тыс. человек.

Градации термического комфорта от сильного холодного стресса до очень сильного теплового стресса наблюдаются в различном соотношении во всех городах (рис. 5, б–з). Для городов, расположенных южнее 53° с. ш., сильный холодный стресс характерен в среднем для 12 дней, между 53° и 55° с. ш. – для 13, севернее 55° с. ш. – для 14 дней. Умеренный холодный стресс для городов, расположенных южнее 53° с. ш., характерен для 125 дней, между 53° и 55° с. ш. – для 136, севернее 55° с. ш. – для 137 дней.

Для градаций термического стресса, смещенных от комфорта в область более высоких температур, меридиональное распределение числа дней, когда отмечаются определенные условия, противоположное: умеренный тепловой стресс в городах, расположенных южнее 53° с. ш., наблюдается в среднем для 241 дня в году, между 53 и 55° с. ш. – для 231, севернее 55° с. ш. – для 224 дней. Сильный тепловой стресс в городах, расположенных южнее 53° с. ш., наблюдается в среднем для 22 дней в году, между 53 и 55° с. ш. – для 13, севернее 55° с. ш. – для 8 дней.

Очень сильный тепловой стресс зафиксирован в 85 городах страны. В региональном разрезе наибольшее число таких городов сосредоточено в Гомельской (33), Минской (23) и Брестской (15) областях. В Гродненской и Могилёвской областях отмечено по 7 таких городов, в то время как в Витебской области подобные условия за рассматриваемый период не регистрировались. Такие условия закономерно отмечаются в большей доле городов кластера высоких значений (30,7 %), чем для кластера низких значений (13,4 %).

Суммарная численность населения в городах с проявлениями очень сильного теплового стресса составляет 2558,0 тыс. человек. Самые крупные из них – Гомель, Брест, Бобруйск, Барановичи, Пинск и Мозырь.

Очень сильный тепловой стресс, так же как и очень сильный холодный стресс, носит в Беларуси эпизодический характер и фиксируется лишь в отдельные дни. В среднем число дней в году, когда отмечается очень сильный тепловой стресс, для городов, расположенных южнее 53° с. ш., составляет 2 дня, а между 53 и 55° с. ш. и севернее 55° с. ш. – 1 день.

Результаты исследования лишь отчасти согласуются с выводами о биоклиматических условиях, полученных на основании ЭЭТ по Айзенштату и индексу суровости климата для периода 1966–2019 гг. [5]. В частности, согласно обоим исследованиям, наиболее комфортные условия (максимальное ЭЭТ по Айзенштату и минимальное значение индекса суровости) характерны для к. п. Нарочь.

Волны тепла. Эпизоды, когда дневные значения UTCI превышают $+32^{\circ}\text{C}$ и относятся к градациям сильного и очень сильного теплового стресса на протяжении 3 дней, представляют собой волны тепла [4, 19]. Волны тепла за рассматриваемый период наблюдались в отдельные годы во всех городах Беларуси. При этом не во всех городах волны тепла наблюдались ежегодно.

В среднем в течение года в городах Беларуси наблюдается две волны тепла общей средней продолжительностью 10 дней, в том числе в 2023 г. – две волны продолжительностью 9 дней, в 2024 г. – четыре волны продолжительностью 18 дней. В 2025 г. от одной до трех волн тепла отмечено в 55 городах (три волны тепла – в 9 городах, две волны тепла – в 15, и одна волна тепла – в 11 городах), их средняя продолжительность составила 5 дней. 2024 г., наоборот, отмечен наибольшим числом и продолжительностью волн тепла в городах. Максимальное число волн тепла в год в отдельных городах составило 6 случаев. Такое число волн отмечено в 24 городах в Брестской (16 городов), Гродненской (2 города) и Минской (6 городов) областях. В 2023 г. в отдельных городах отмечено до пяти волн тепла, а в 10 городах – более пяти волн.

За рассматриваемый период средняя суммарная продолжительность волн тепла в городах находилась в диапазоне от 1 до 22 дней (см. рис. 3, б). Средняя продолжительность волн тепла менее 3 дней характерна для городов, где волны тепла отмечались не ежегодно.

Суммарная продолжительность волн тепла за год в городах Беларуси возрастает в направлении с северо-запада на юго-восток. При этом сохраняется и выраженная широтная градация: для городов, расположенных южнее 53° с. ш. продолжительность волн тепла за год в среднем за период составляет 16 дней, между 53 и 55° с. ш. – 8, севернее 55° с. ш. – 4 дня. Большая часть населения Беларуси проживает в городах с общей годовой продолжительностью волн тепла до 10 дней – 4446,4 тыс. человек (в 108 городах), 2538,6 тыс. человек – в 87 городах с продолжительностью волн тепла от 10 до 20 дней в год и 172,3 тыс. человек – в 5 городах (Столин, Брагин, Калинковичи, Мозырь и Хойники) с продолжительностью волн тепла 20 дней в год и выше.

Максимальная продолжительность единичной волны тепла в городах Беларуси находится в диапазоне от 3 до 12. Волны тепла максимальной продолжительностью 3 дня – минимальный период, характеризуемый как волна тепла, есть только в одном городском населенном пункте – к. п. Нарочь. Максимальная продолжительность волн тепла до 5 дней включительно характерна для 55 городов с общей численностью населения 2976,1 тыс. человек (включая Минск и Витебск), от 5 до 10 дней – для 116 городов с общей численностью населения 3040,6 тыс. (включая Брест, Гродно, Могилёв), свыше 10 дней – для 29 городов с общей численностью населения 1140,5 тыс. человек (включая Гомель).

Убывание в меридиональном направлении также выражено и для максимальной продолжительности единичной волны тепла: для городов, расположенных южнее 53° с. ш. значение этого показателя составляет в среднем 10 дней, между 53 и 55° с. ш. – 6, севернее 55° с. ш. – 5 дней.

Максимальная зарегистрированная продолжительность единичной волны тепла составила 12 дней и наблюдалась в Столине с 24 августа по 4 сентября 2024 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+28,6$ до $+32,3^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+32,0$ до $+36,4^{\circ}\text{C}$ в условиях практически ясного неба, слабого ветра и штиля, относительной влажности воздуха 22,0–40,2 %.

Волны тепла продолжительностью 11 дней наблюдались в 2024 г. в 29 городах, большинство которых расположено в Гомельской области. Наиболее населенные города, где отмечены волны тепла продолжительностью до 11 дней:

– Гомель – с 8 по 18 июля 2024 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+27,1$ до $+34,2^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+33,8$ до $+40,1^{\circ}\text{C}$ в условиях ясного неба, слабого ветра и штиля, относительной влажности воздуха 38,6–69,4 %;

– Пинск – с 24 августа по 3 сентября 2024 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+27,4$ до $+30,9^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+32,1$ до $+34,7^{\circ}\text{C}$ в условиях ясного неба, слабого ветра и штиля, относительной влажности воздуха 28,0–48,8 %;

– Мозырь – с 18 по 18 июля 2024 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+26,3$ до $+36,5^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+33,1$ до $+41,6^{\circ}\text{C}$ в условиях ясного неба, слабого ветра и относительной влажности воздуха 31,0–71,9 %;

– Жлобин – с 8 по 18 июля 2024 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+26,3$ до $+34,1^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+32,5$ до $+39,6^{\circ}\text{C}$ в условиях ясного неба, слабого ветра и относительной влажности воздуха 38,4–74,1 %;

В Минске за указанный период отмечено две волны тепла продолжительностью 3 и 5 дней:

– с 15 по 19 августа 2023 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+26,3$ до $+36,5^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+32,7$ до $+35,3^{\circ}\text{C}$ в условиях ясного неба, слабого ветра и относительной влажности воздуха 43,4–52,5 %;

– с 11 по 13 июля 2024 г. при температуре атмосферного воздуха в полдень от $+26,3$ до $+36,5^{\circ}\text{C}$, значении индекса UTCI – от $+33,5$ до $+36,7^{\circ}\text{C}$ в условиях ясного неба, слабого ветра и штиля, и относительной влажности воздуха 49,0–65,2 %.

Полученные значения в целом согласуются с имеющимися немногочисленными к настоящему времени оценками для других стран Европы. В частности, в работе [19] показано, что в Польше для условий метеорологических станций без учета влияния города в среднем за период с 2016–2018 гг. число волн тепла находилось в диапазоне от 0 до 6. Наиболее продолжительные волны тепла (до 16 дней) регистрировались в 1994, 2006, 2010 и 2015 г. В то же время полученные результаты исследований для других регионов [19, 20] указывают на высокую межгодовую вариабельность количества и продолжительности волн тепла. В городах Беларуси в течение рассматриваемого периода динамика числа и продолжительности волн тепла неустойчива, разнонаправлена и требует более детального изучения.

Вклад урбанизации в биоклиматическую комфортность. Общегеографические закономерности распределения индекса для городов нарушаются за счет изменения условий на урбанизированных территориях. Чтобы учесть этот «эффект города», расчет индекса $UTCI$ проводили на базе данных метеоплощадок ($UTCI^{bg}$). В среднем для городов Беларуси значения индекса $UTCI^{bg}$ составили от +5,3 до +8,6 °C. Наблюдается выраженный пространственный тренд: значения индекса $UTCI^{bg}$ возрастают в направлении с северо-востока на юго-запад. Данная динамика отражает фундаментальные географические закономерности регионального климата, так как использование метеорологических данных в сочетании с параметрами поверхности, типичными для метеоплощадок, позволяет исключить влияние неоднородности городской застройки и специфики землепользования. Сходные диапазоны значений получены и для сопредельных с Беларусью территорий Польши [21], при общем зональном градиенте с северо-востока на юго-запад, нарушаемом в горных районах страны на юге и юго-западе, где достигаются наиболее низкие отрицательные среднегодовые значения индекса.

Разность значений индекса в условиях городской застройки и фоновых условий ($UTCI^d = UTCI^{urb} - UTCI^{bg}$) в среднем в течение года находилась в диапазоне от +1,3 до +3,4 °C. Это свидетельствует о смещении микроклимата городов в область более высоких значений тепловой нагрузки за счет влияния застройки. К числу городов с минимальным антропогенным приращением индекса за счет структуры землепользования относятся Радунь, Брагин и Любча.

Ряд населенных пунктов, для которых пространственный анализ выявил статистически значимое отклонение от соседних городов, входящих в кластер высоких значений (Порозово, Васи́леви́чи, Косово, Озаричи), характеризуются умеренными значениями $UTCI^d$ (от +1,5 до +1,6 °C). В то же время для к. п. Нарочь, продемонстрировавшего значимое отличие от кластера низких значений, зафиксирован наиболее высокое среди городов Беларуси значение $UTCI^d$.

Выявленные мезомасштабные различия детерминированы средневзвешенными значениями фактора видимости неба (svf) и параметра шероховатости поверхности (z_0). Это подтверждает гипотезу о нарушении географической зональности в пространственном распределении климатической комфортности под воздействием структуры землепользования. Трансформация метеорологических условий при смене типов землепользования (на примере конверсии промышленных зон в лесопарковые кластеры в Гомеле) детально подтверждена методами численного мезомасштабного моделирования в работе [22].

Для отдельных населенных пунктов и расчетных сроков значение $UTCI^d$ находилось в диапазоне от –6,7 до +17,2 °C при медианном значении +2,0 °C. Максимальные положительные аномалии индекса зафиксированы в холодный период, что обусловлено существенным снижением скорости ветра под влиянием городской морфологии и структуры землепользования. К числу населенных пунктов, где наиболее часто значение индекса на +10 °C и более выше относительно условий метеоплощадок, относятся к. п. Нарочь, г. п. Зелёный Бор, Берёзовка, Елизово. Указанные города характеризуются высокими значениями параметра шероховатости поверхности, что объясняется значительной долей древесной растительности в пределах их границ (классы LCZ A и LCZ B). Высокая плотность растительного покрова способствует более интенсивному снижению скорости ветра (эффекту аэродинамической тени), что в условиях низких температур приводит к значительному сокращению ветрового охлаждения и, как следствие, к росту тепловой комфортности по шкале $UTCI$.

Среднемесячные приращения индекса в городах изменяются в диапазоне от +0,1 до +4,3 °C (рис. 6), при этом распределение $UTCI^d$ характеризуется выраженной сезонной и суточной вариабельностью. Максимальный прирост значений фиксируется в зимний период, что в условиях отрицательных температур воздуха способствует повышению биоклиматической комфортности среды. Наиболее отчетливо данный эффект проявляется в утренние и вечерние часы. В марте среднее избыточное значение индекса в городах составляет +3,0 °C с локальными максимумами в вечернее и ночное время. В период с мая по август средний прирост $UTCI$ относительно фоновых условий не превышает +1,0 °C. Суточный ход в этот сезон характеризуется инверсионным характером: в вечерние и ночные часы наблюдаются слабopоложительные аномалии (до +2,2 °C), в то время как в утренние и дневные часы изменение индекса становится преимущественно отрицательным (до –1,3 °C).

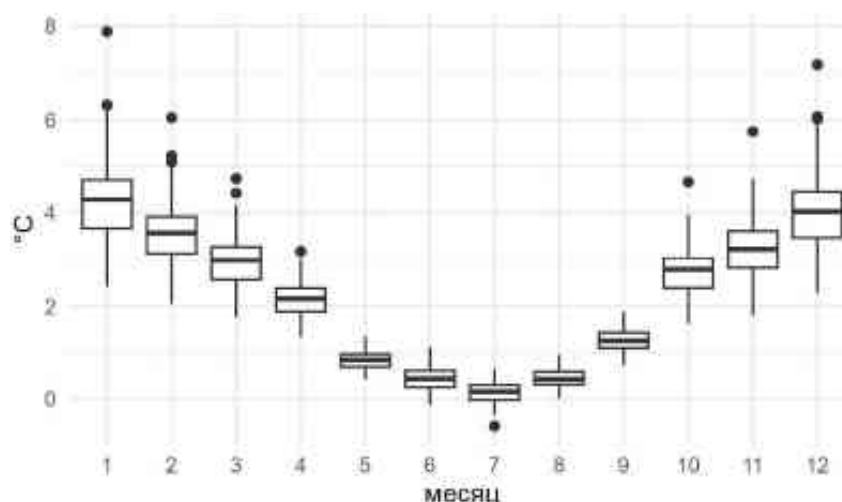


Рис. 6. Внутригодовая динамика изменения индекса UTCI ($UTCi^d$) в городах Беларуси относительно условий метеорологических площадок

Fig. 6. Intra-annual dynamics of the UTCI change ($UTCi^d$) in cities of Belarus relative to meteorological station conditions

В осенние месяцы средние значения $UTCi^d$ находятся в диапазоне от +1,2 до +3,2 °C, демонстрируя устойчивую тенденцию к росту по мере приближения к зимнему сезону. В суточном разрезе сохраняется общая закономерность: повышенные значения приурочены к ночному, вечернему и утреннему периодам, в то время как дневные минимумы отражают снижение антропогенного вклада в формирование биоклиматического комфорта.

Отрицательные значения $UTCi^d$ отмечены для 15,5 % случаев от общего объема выборки, в разрезе отдельных населенных пунктов этот показатель находится в диапазоне от 6,4 до 22,9 %. Наиболее часто эффект смещения показателя биоклиматической комфортности в область более низких значений на счет структуры землепользования урбанизированных территорий наблюдается в к. п. Нарочь, Домачево, Езерище, Берёзовка и Видзы. Напротив, минимальная повторяемость отрицательных аномалий характерна для таких городов, как Смолевичи, Фаниполь, Несвиж и Дзержинск.

Примечательно, что высокая частота отрицательных изменений индекса в городе не имеет прямой корреляционной связи с его средними значениями. Величина и вектор трансформации биоклиматической комфортности, несмотря на расчет на основе ограниченного набора параметров, являются следствием уникальной суперпозиции факторов: структуры землепользования, текущих метеорологических условий, географического положения объекта, а также сезонности и высоты стояния Солнца. Сложная природа выявленных взаимодействий обуславливает необходимость дальнейших детальных исследований в данной области.

Распределение категорий термического стресса на урбанизированных территориях также демонстрирует значимые отличия от фоновых условий метеоплощадок. За счет структуры землепользования в городах продолжительность комфортных условий (категория «отсутствие термического стресса») увеличивается на 3,2–12,2 п. п. (в среднем на 5,7 п. п.). Также отмечается рост повторяемости условий легкого холодового стресса в диапазоне от 2,0 до 11,6 п. п. (в среднем на 4,4 п. п.).

Для категорий, характеризующихся выраженным термическим дискомфортом, в городской среде наблюдается обратная тенденция – сокращение их продолжительности. Так, повторяемость условий умеренного холодового стресса снижается в среднем на 5,3 п. п., сильного холодового стресса – на 3,6, очень сильного – на 0,2 п. п. Аналогичная динамика прослеживается и для теплового стресса: продолжительность умеренного, сильного и очень сильного теплового стресса сокращается в среднем на 0,2; 0,8 и 0,1 п. п. соответственно.

В течение года в городах, при идентичных исходных метеорологических параметрах, фиксируется в среднем на 12 дней больше с дневными значениями $UTCi$ выше +32 °C по сравнению с условиями метеоплощадок. Поскольку данный порог является первичным условием для выделения волн тепла, учет структуры землепользования существенно меняет статистику данных явлений. Без учета структуры землепользования в условиях метеоплощадок средняя продолжительность волн тепла больше на 10–19 дней, их среднегодовое число в городах – на 2–3, максимальная продолжительность единичной волны тепла – на 12–22 дня.

Таким образом, согласно полученным результатам, в настоящее время структура землепользования урбанизированных территорий Беларуси способствует формированию более комфортных биоклиматических условий относительно фона (метеорологическая площадка). Влияние городской среды носит комплексный характер и выражается не только в сокращении периодов дискомфорта, обусловленного низкими температурами, но и в снижении частоты и продолжительности волн тепла. Учет параметров городской застройки и специфики подстилающей поверхности (в сравнении с условиями открытых метеоплощадок) демонстрирует сокращение расчетной длительности волн тепла, что подчеркивает защитную роль городской морфологии в летний период. Для городов умеренного климата Беларуси результаты оценки влияния урбанизации на биоклиматическую комфортность отличаются от единичных в настоящее время исследований других регионов [23], где в условиях изначально более теплого климата выражено влияние городских островов тепла и показано снижение биоклиматической комфортности в городах. Дальнейшего детального изучения требует сопряженный анализ интенсивностей городских островов тепла, определяемых по температуре поверхности, и интегральных показателей биоклиматического комфорта населения.

Выводы.

1. Зафиксированная пространственная дифференциация свидетельствует о том, что распределение биоклиматической комфортности городов Беларуси подчинено четко выраженной зональности. Значения индекса UTCI последовательно возрастают в направлении с северо-востока на юго-запад, отражая фоновые климатические градиенты региона, при этом средние годовые значения для городских территорий зафиксированы в диапазоне от +7,5 до +11,0 °C.

2. Наблюдаемое нарушение географической зональности биоклиматических условий определяется уникальностью структуры землепользования каждого населенного пункта. Применение в расчетах параметров подстилающей поверхности, таких как фактор видимости неба и шероховатость, позволило выявить существенные отклонения индекса UTCI от фоновых градиентов, что доказывает значимость планировочной структуры города как фактора формирования биоклиматического комфорта.

3. Выявленная внутригодовая вариабельность биоклиматических условий в городах характеризуется существенным размахом значений UTCI (от -31,0 до +42,2 °C) и сезонной трансформацией характера аномалий. Структура термического режима меняется от преобладания агрессивных холодных воздействий зимой к доминированию теплых нагрузок в летний период, при этом пик изменчивости приходится на май. Несмотря на превалирование комфортных условий (для 41,0 % времени), в городах эпизодически фиксируются категории сильного (для 1,8 % – холодового; для 1,0 % – теплового) и очень сильного стресса (менее 0,10 % суммарно). Данные нагрузки носят строго сезонный характер: экстремальное охлаждение ограничено периодом с ноября по март (максимум в январе), а интенсивный перегрев – периодом с мая по сентябрь (максимум в августе), при этом случаи экстремального стресса в городах Беларуси не выявлены.

4. Зафиксированный эффект термальной оптимизации указывает на роль городской среды как термального буфера в условиях умеренного климата Беларуси. Трансформация метеорологического режима за счет застройки приводит к росту средних значений UTCI на +1,3...+3,4 °C, что обеспечивает увеличение продолжительности комфортных условий в среднем на 5,7 п. п. и сокращение периодов холодового стресса (от умеренного до очень сильного) в среднем суммарно на 9,2 п. п., более отчетливо проявляющееся в зимний период и ночные часы.

5. Показанное сокращение продолжительности условий теплового стресса (от умеренного до очень сильного суммарно) в среднем на 1,1 п. п. (с 8,1 до 7,6 %), а также сокращение общей продолжительности волн тепла на 10–19 дней и их повторяемости на 2–3 единицы в условиях городской застройки свидетельствуют о модуляции экстремальных состояний за счет структуры землепользования на современном этапе для городов Беларуси. В отличие от регионов с жарким климатом в городах Беларуси зафиксировано снижение частоты и кумулятивной продолжительности волн тепла по сравнению с открытыми площадками, что обусловлено защитными свойствами городской морфологии и растительности (классы LCZ A и LCZ B), нивелирующими тепловую нагрузку в дневные часы.

Полученные значения представляют собой количественные оценки биоклиматического комфорта в городах Беларуси. Показано многокомпонентное положительное разное интенсивности влияние урбанизации на климатическую комфортность, выявленное относительно условий метеоплощадки. Полученные результаты целесообразно дополнить углубленным изучением структуры биоклиматического комфорта на следующих этапах, а также изучением их более долгосрочной динамики и с учетом климатических прогнозов. Результаты оценки могут служить основой для изучения климатического потенциала городов и уточнения планов развития населенных пунктов с учетом биоклиматической комфортности.

Благодарности.

Работа выполнена в рамках задания 1.01 «Геоэкологические риски: прогнозы, оценки последствий, способы адаптации и снижения негативных воздействий» научно-исследовательской работы 3 «Разработать научные основы рационального использования геоэкологического потенциала урбанизированных территорий Беларуси» государственной программы научных исследований «Рациональное природопользование» на 2026–2030 годы.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of task 1.01 “Geoecological risks: forecasts, impact assessments, adaptation methods and reduction of negative impacts” of research work 3 “Develop scientific foundations for the rational use of the geoecological potential of urbanized territories of Belarus” of the state scientific research program “Rational Nature Management” for 2026–2030.

Список использованных источников

1. Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification / O. Potchter, P. Cohen, T. Lin, A. Matzarakis // *Science of the Total Environment*. – 2018. – Vol. 631–632. – P. 390–406. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.276.
2. An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI) / K. Błażejczyk, G. Jendritzky, P. Bröde [et al.] // *Geographia Polonica*. – 2013. – Vol. 86, № 1. – P. 5–10. – DOI: 10.7163/GPol.2013.1.
3. Fiala, D. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system / D. Fiala, K. J. Lomas, M. Stohrer // *Journal of Applied Physiology*. – 1999. – Vol. 87, № 5. – P. 1957–1972. – DOI: 10.1152/jappl.1999.87.5.1957.
4. Heat and health in the WHO European Region: updated evidence for effective prevention / World Health Organization. Regional Office for Europe. – Copenhagen : WHO, 2021. – 190 p.
5. Особенности изменения комфортности климата Беларуси для человека по месяцам и сезонам года / В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков, П. О. Зайко, О. Г. Савич-Шемят // *Природопользование*. – 2022. – № 1. – С. 5–21. – DOI: 10.47612/2079-3928-2022-1-5-21.
6. Логинов, В. Ф. Изменение биоклиматического потенциала Республики Беларусь / В. Ф. Логинов, О. Г. Савич-Шемят, М. А. Хитриков // *Природные ресурсы*. – 2022. – № 1. – С. 5–14.
7. Витченко, А. Н. Геоэкологическая оценка комфортности климата крупных городов Беларуси / А. Н. Витченко, И. А. Телеш // *Вестник БГУ. Серия 2*. – 2008. – № 3. – С. 73–78.
8. Matzarakis, A. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the RayMan model / A. Matzarakis, F. Rutz, H. Mayer // *International Journal of Biometeorology*. – 2007. – Vol. 51, № 4. – P. 323–334. – DOI: 10.1007/s00484-006-0061-8.
9. Holmer, B. Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI / B. Holmer, U. Postgård, M. Ericksson // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2001. – Vol. 68, № 1–2. – P. 33–40. – DOI: 10.1007/s007040170051.
10. Froehlich, D. Estimation of human-biometeorological conditions in south west Germany for the assessment of mitigation and adaptation potential / D. Froehlich, A. Matzarakis // *Conference Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate*. – 2015. – P. 1–6.
11. Kasten, F. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud / F. Kasten, G. Czeplak // *Solar Energy*. – 1980. – Vol. 24, № 2. – P. 177–189. – DOI: 10.1016/0038-092X(80)90391-6.
12. Molina, M. O. Comparison of ERA5 surface wind speed climatologies over Europe with observations from the HadISD dataset / M. O. Molina, C. Gutiérrez, E. Sánchez // *International Journal of Climatology*. – 2021. – Vol. 41, № 10. – P. 4864–4878. – DOI: 10.1002/joc.7103.
13. Stewart, I. D. Local climate zones for urban temperature studies / I. D. Stewart, T. R. Oke // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2012. – Vol. 93, № 12. – P. 1879–1900. – DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
14. Global map of Local Climate Zones / M. Demuzere, J. Kittner, A. Martilli [et al.] // *Earth System Science Data*. – 2022. – Vol. 14, iss. 8. – DOI: 10.5194/essd-14-3835-2022.
15. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones / A. Middel, K. Häb, A. J. Brazel [et al.] // *Landscape and Urban Planning*. – 2014. – Vol. 122. – P. 16–28. – DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.11.004.
16. Impact of sky view factor on seasonal microclimate and thermal comfort variability across urban campus streets and buildings / Z. Yao, P. Wang, Y. Tian [et al.] // *Urban Climate*. – 2025. – Vol. 60. – P. 1–20. – DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102315.
17. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden disease / A. R. Garcia [et al.]. – Geneva : WHO, 2016. – 121 p.
18. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI) / P. Bröde, D. Fiala, K. Błażejczyk [et al.] // *International Journal of Biometeorology*. – 2012. – Vol. 56, № 3. – P. 481–494. – DOI: 10.1007/s00484-011-0454-1.

19. Tomczyk, A. M. Human-biometeorological conditions during heat waves in Poland / A. M. Tomczyk, E. Bednorz, A. Matzarakis // *International Journal of Climatology*. – 2020. – Vol. 40, № 12. – P. 5043–5055. – DOI: 10.1002/joc.6503.
20. Vinogradova, V. V. Universal Thermal Climate Index (UTCI) in the middle of the 21st century according to model forecasts / V. V. Vinogradova // *Bulletin of the RAS Geography*. – 2025. – Vol. 89, № 3. – P. 63–74. – DOI: 10.7868/S2658697525030066.
21. Kuchcik, M. Long-term changes in hazardous heat and cold stress in humans: multi-city study in Poland / M. Kuchcik, K. Błażejczyk, A. Halaś // *International Journal of Biometeorology*. – 2021. – Vol. 65, № 9. – P. 1567–1578. – DOI: 10.1007/s00484-020-02069-7.
22. Лысенко, С. А. Метеорологическое моделирование городских «островов тепла» на территории Беларуси в условиях современного глобального потепления / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 2. – С. 134–143. – DOI: 10.29235/1561-8323-2023-67-2-134-143.
23. Solanki, P. Optimizing sky view factor and vegetation to mitigate urban heat in hot-humid climates / P. Solanki, L. R. Amirtham, C. Deb // *Build. Environ.* – 2025. – Vol. 268. – P. 1121–1135. – DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.112135.

References

1. Potchter O., Cohen P., Lin T., Matzarakis A. Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of The Total Environment*, 2018, vol. 631–632, pp. 390–406, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.276.
2. Błażejczyk K., Jendritzky G., Bröde P., Fiala D., Havenith G., Epstein Y., Psikuta A., Kampmann B. An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI). *Geographia Polonica*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 5–10, DOI: 10.7163/GPol.2013.1
3. Fiala D., Lomas K. J., Stohrer M. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of Applied Physiology*, 1999, vol. 87, no. 5, pp. 1957–1972, DOI: 10.1152/jappl.1999.87.5.1957.
4. WHO. Heat and health in the WHO European Region: updated evidence for effective prevention. Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe Publ., 2021, 190 p.
5. Loginov V. F., Khitrykov M. A., Zaiko P. O., Savich-Shemet O. G. *Osobennosti izmeneniya komfortnosti klimata Belarusi dlya cheloveka po mesyatsam i sezonam goda* [Specifics of changes in the climate comfort of Belarus for humans by months and seasons of the year]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 5–21, DOI: 10.47612/2079-3928-2022-1-5-21. (in Russian)
6. Loginov V. F., Savich-Shemet O. G., Khitrykov M. A. *Izmenenie bioklimaticheskogo potentsiala Respubliki Belarus'* [Change in the bioclimatic potential of the Republic of Belarus]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2022, no. 1, pp. 5–14. (in Russian)
7. Vitchenko A. N., Telesh I. A. *Geoekologicheskaya otsenka komfortnosti klimata krupnykh gorodov Belarusi* [Geoeological assessment of climate comfort in large cities of Belarus]. *Vestnik BGU. Seriya 2 = Bulletin of BSU. Series 2*, 2008, no. 3, pp. 73–78. (in Russian)
8. Matzarakis A., Rutz F., Mayer H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 2007, vol. 51, no. 4, pp. 323–334, DOI: 10.1007/s00484-006-0061-8.
9. Holmer B., Postgård U., Ericksson M. Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI. *Theoretical and Applied Climatology*, 2001, vol. 68, no. 1–2, pp. 33–40, DOI: 10.1007/s007040170051.
10. Froehlich D., Matzarakis A. Estimation of human-biometeorological conditions in south west Germany for the assessment of mitigation and adaptation potential. *Conference Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate*, 2015, pp. 1–6.
11. Kasten F., Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, 1980, vol. 24, no. 2, pp. 177–189, DOI: 10.1016/0038-092X(80)90391-6.
12. Molina M. O., Gutiérrez C., Sánchez E. Comparison of ERA5 surface wind speed climatologies over Europe with observations from the HadISD dataset. *International Journal of Climatology*, 2021, vol. 41, no. 10, pp. 4864–4878, DOI: 10.1002/joc.7103.
13. Stewart I. D., Oke T. R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, vol. 93, no. 12, pp. 1879–1900, DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
14. Demuzere M., Kittner J., Martilli A., Mills G., Moede C., Stewart I. D., van Vliet J., Bechtel B. Global map of Local Climate Zones. *Earth System Science Data*, 2022, vol. 14, iss. 8. DOI: 10.5194/essd-14-3835-2022.
15. Middel A., Häb K., Brazel A. J., Martin C. A., Guhathakurta S. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 2014, vol. 122, pp. 16–28, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.11.004.

16. Yao Z., Wang P., Tian Y., Zhang Y., Zhang Q., Wang X., Wang P., Han Q. Impact of sky view factor on seasonal microclimate and thermal comfort variability across urban campus streets and buildings. *Urban Climate*, 2025, vol. 60, pp. 1–20, DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102315.
17. Garcia A. R. et al. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden disease. Geneva, WHO Publ., 2016, 121 p.
18. Bröde P., Fiala D., Błażejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Tinz B., Havenith G. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 2012, vol. 56, no. 3, pp. 481–494, DOI: 10.1007/s00484-011-0454-1.
19. Tomczyk A. M., Bednorz E., Matzarakis A. Human-biometeorological conditions during heat waves in Poland. *International Journal of Climatology*, 2020, vol. 40, no. 12, pp. 5043–5055, DOI: 10.1002/joc.6503.
20. Vinogradova V. V. Universal Thermal Climate Index (UTCI) in the middle of the 21st century according to model forecasts. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2025, vol. 89, no. 3, pp. 406–419, DOI: 10.7868/S2658697525030066.
21. Kuchcik M., Błażejczyk K., Halaś A. Long-term changes in hazardous heat and cold stress in humans: multi-city study in Poland. *International Journal of Biometeorology*, 2021, vol. 65, no. 9, pp. 1567–1578, DOI: 10.1007/s00484-020-02069-7.
22. Lysenko S. A., Zaiko P. A. *Meteorologicheskoe modelirovanie gorodskih "ostrovov tepla" na territorii Belarusi v usloviyah sovremennogo global'nogo potepleniya* [Meteorological modeling of urban "heat islands" on the territory of Belarus under modern global warming]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 2, pp. 134–143 (in Russian), DOI: 10.29235/1561-8323-2023-67-2-134-143. (in Russian)
23. Solanki P., Amirtham L. R., Deb C. Optimizing sky view factor and vegetation to mitigate urban heat in hot-humid climates. *Building and Environment*, 2025, vol. 268, pp. 1121–1135, DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.112135.

Информация об авторах

Крукотская Ольга Юрьевна – кандидат географических наук, заведующий лабораторией оптимизации геосистем, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: olgakrukowskaya@gmail.com

Алисиевич Святослав Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории оптимизации геосистем, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: geo.sviatalv@gmail.com

Information about the authors

Olga Yu. Krukowskaya – Ph. D. (Geography), Head of Laboratory of Geosystem Optimization, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: olgakrukowskaya@gmail.com

Sviataslau U. Alisiyevich – Junior Researcher, Laboratory of Geosystem Optimization, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: geo.sviatalv@gmail.com

ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВЫХ ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УРБОЛАНДШАФТАХ г. БОБРУЙСКА

Е. А. Кухлевский, А. А. Карпиченко

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье изложена методика и представлены результаты ГИС-моделирования потоковых ландшафтно-геохимических систем г. Бобруйска с использованием ArcGIS Pro (модуль Arc Hydro). Актуальность исследования обусловлена необходимостью выявления особенностей миграции химических элементов в антропогенно изменённой городской среде, где поверхностный сток регулируется инженерной инфраструктурой.

Цель работы – выделить и картографировать локальные водосборы на территории города как основу анализа потоковых ландшафтно-геохимических систем, выявления, интерпретации и прогноза аномалий техногенных веществ в компонентах урболандшафтов.

Методика исследований включала обработку цифровой модели рельефа, поэтапное выделение направлений и аккумуляции стока, идентификацию водотоков, векторизацию и ручную корректировку границ водосборов, а также увязку полученных полигонов с коллекторной сетью города. По результатам ГИС-моделирования создана схема исходных природообусловленных локальных водосборов на территории г. Бобруйска, полученная в результате автоматической генерации границ водосборов. На основе данной схемы путём её интеграции с коллекторной сетью города создана схема современной структуры водосборов на территории города с выделением 11 водосборных бассейнов, формирующих систему потоковых ландшафтно-геохимических систем города.

Ключевые слова: урболандшафты; водосборные бассейны; потоковые ландшафтно-геохимические системы; ГИС; модуль ArcHydro; ливневая канализация.

Для цитирования. Кухлевский Е. А., Карпиченко А. А. ГИС-моделирование потоковых ландшафтно-геохимических систем в урболандшафтах г. Бобруйска // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 148–159.

GIS MODELING OF FLOW LANDSCAPE AND GEOCHEMICAL SYSTEMS IN URBAN LANDSCAPES OF BOBRUIISK

E. A. Kukhlevski, A. A. Karpichenka

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. This article presents the methodology and results of GIS modeling of flow landscape-geochemical systems in the city of Bobruisk using ArcGIS Pro (ArcHydro module). The relevance of the study stems from the need to identify migration patterns of chemical elements in an anthropogenically modified urban environment where surface runoff is regulated by utility infrastructure.

The goal of the study is to identify and map local watersheds within the city as a basis for analyzing flow landscape geochemical systems, identifying, interpreting and predicting anomalies of technogenic substances in urban landscape components.

The research methodology included processing of digital elevation models (DEM), step-by-step identification of flow directions and accumulation, stream identification, vectorization, manual adjustment of catchment boundaries, linking the resulting polygons to the city's drainage network. Based on GIS modeling results, a map of original naturally conditioned local watersheds in Bobruisk city was created by automatic generation of watershed boundary. This map was integrated with the city drainage network to create a map of current catchment structures. It identified 11 watersheds forming the city landscape-geochemical system.

Keywords: urban landscapes; watersheds; flow landscape-geochemical systems; GIS; ArcHydro module; storm sewers.

For citation. Kukhlevski E. A., Karpichenka A. A. GIS modeling of flow landscape and geochemical systems in urban landscapes of Bobruisk. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 148–159.

Введение. Большинство современных геохимических исследований почв городов подразумевает отбор верхнего почвенного горизонта по регулярной сети. Данная система пробоотбора не учитывает особенности рельефа, который является одним из ведущих факторов в перераспределении химических элементов в почвенно-грунтовой покрове города. В Европейском союзе принята следующая методика составления сети пробоотбора, созданная в рамках Европейского проекта по геохимическому картографированию городских почв [1]. Суть методики заключается в наложении на топографическую карту или кадастровый план (обычно масштаба 1 : 5000 или 1 : 10 000) регулярной сети с ячейками 500 м × 500 м в центральных плотно застроенных районах и 1000 м × 1000 м в пригородах [1]. Узлы сетки служат точками отбора проб. Для города типовой площадью около 100–125 км² формируется сеть из 400–500 пробоотборных точек. Такой подход обеспечивает равномерное пространственное покрытие городской территории и стандартизирует процедуру, делая её пригодной для межгородских и международных сравнений, а также для проведения мониторинга и анализа динамики загрязнения. Основное преимущество регулярной сетки – простота планирования работ, воспроизводимость и возможность статистической обработки полученного массива данных. Однако данный метод не учитывает градостроительные, природные и функциональные особенности отдельных зон города, поэтому может быть менее чувствителен к локальным источникам загрязнений и результатам миграционного перераспределения химических элементов. В Беларуси применяют схожие подходы при проведении ландшафтно-геохимического обследования городов, при этом существуют различия в технических нормативных правовых актах относительно требований к плотности сети отбора проб почв и размерам пробных площадок [2].

Альтернативой данному подходу является выделение элементарных ландшафтов в городах, что является основой ландшафтно-геохимического картографирования урбанизированных территорий. Такой подход предполагает деление городской среды на относительно однородные по природным и антропогенным признакам участки, обладающие единым направлением миграции веществ, сходными геохимическими барьерами, источниками загрязнения и режимами аккумуляции элементов. Классическим примером является схема, предложенная М. А. Глазовской [3] и развиваемая А. Н. Курбатовой [4], где городской ландшафт представляется как мозаика элементарных геохимических участков, сформированных сочетанием рельефа, характера застройки, типов почвы, растительности, гидросети и функционирования инженерных коммуникаций. Каждая элементарная ландшафтная ячейка считается геохимически самостоятельным микрорайоном, для которого в дальнейшем проводят специализированный пробоотбор, анализ миграции и аккумуляции тяжёлых металлов либо органических загрязняющих веществ. Например, А. Н. Курбатова рекомендовала формировать каскадную ландшафтно-геохимическую систему с учётом транспортных потоков, плотности застройки, типа функционального использования участка (жилой, промышленный, рекреационный, дорожный), особенностей гидродинамики и дренажной системы городов. Ландшафт как потоковая система – это сложная пространственно-организованная целостность, в которой ведущую роль играют процессы переноса вещества и энергии между различными морфологическими элементами ландшафта. Основу потоковой организации составляет наличие устойчивых направлений и механизмов миграции вещества – воды, растворённых соединений, взвешенных почвенных частиц (включая различные поллютанты), которые передвигаются по определённым миграционным каналам, обусловленным рельефом, фильтрационными свойствами приповерхностных отложений, характером гидрологической сети и зарегулированностью поверхностного стока. Такой функционально-генетический подход позволяет не только дифференцировать городскую территорию по уровням содержания химических веществ в компонентах ландшафта, но и выявлять и интерпретировать локализацию ореолов загрязнения и их связь с источниками поступления поллютантов и геохимическими барьерами на путях миграции химических веществ.

А. Н. Курбатова акцентирует внимание на том, что ландшафтная потоковая система формируется в результате совместного действия природных (например: сток воды, ветровая и гравитационная эрозия, инфильтрация через почву) и антропогенных (строительство, транспортные коммуникации, сброс сточных вод) процессов. В городской среде потоки меняют направление или усиливаются из-за дренажа территорий, канализации вод, выноса и аккумуляции загрязняющих веществ в понижениях рельефа, поймах, оврагах и других аккумуляционных зонах. В рамках этого подхода ландшафт рассматривается не как совокупность статических единиц, а как динамичная система взаимодействующих потоков вещества и энергии, структура и функционирование которой определяются как особенностями природных условий, так и характером и интенсивностью техногенной нагрузки. Анализ потоковых систем, картографирование путей миграции и геохимических барьеров [5], определение функциональных зон позволяют более глубоко понять процессы формирования геохимического поля урбандиафтов и их пространственную структуру.

При анализе потоковых систем необходимо учитывать специфику геохимической обстановки в урболандшафтах. В отличие от естественных условий, в городских почвах и грунтах вследствие поступления и накопления различных загрязняющих веществ изменяются кислотнo-щелочные свойства почвенной среды в сторону подщелачивания (данная особенность характерна и для г. Бобруйска [6]), что является важным фактором, оказывающим влияние на подвижность поллютантов (тяжёлых металлов). От уровня pH зависит форма существования этих элементов, их сорбция и миграционная способность [7]. При снижении pH, т. е. при возрастании кислотности, количество свободных ионов водорода в почвенном растворе увеличивается, и эти ионы вытесняют в почвенный раствор ионы тяжёлых металлов из почвенного-поглощающего комплекса, что способствует их миграции. Как правило, в кислых почвах ($\text{pH} < 5,0$) такие элементы, как кадмий, цинк, свинец, никель, медь, марганец становятся гораздо менее прочно связанными с глинистыми минералами и органическим веществом, и их концентрация в почвенном растворе существенно возрастает. Это происходит по той причине, что при высоком содержании ионов водорода металлы менее интенсивно удерживаются в составе нерастворимых гидроксидов, карбонатов и органо-минеральных соединений, а их десорбция с поверхности почвенных частиц облегчается. Кроме того, при низких значениях pH разрушаются органические и органо-минеральные комплексы, в которых металлы обычно слабо мигрируют, а также снижается микробиологическая активность, способствующая созданию труднорастворимых форм металлов [7]. В результате в кислых дерново-подзолистых почвах металлы демонстрируют значительно большую подвижность, легче вымываются в более глубокие горизонты, попадают в грунтовые воды и становятся доступными растениям.

В урболандшафтах ситуация иная, как отмечалось ранее. Щелочность почв – частое явление в городах из-за обильного поступления золы, пыли со строительных площадок, известкования, влияния бетона и цемента, антигололёдных реагентов. В нейтральной и особенно щелочной среде ($\text{pH} > 7,0$) ряд тяжёлых металлов осаждается в виде малоподвижных соединений, их миграционная активность резко падает, и они в основном фиксируются в верхних горизонтах почвенно-грунтовой толщи. Металлы, такие как свинец, медь, цинк, кадмий и никель, при таких условиях переходят в формы, слабо растворимые в воде, поскольку в щелочной среде их обычные катионы быстро связываются с ионами OH^- , CO_3^{2-} и PO_4^{3-} , образуя нерастворимые или слаборастворимые осадки [7]. Это значительно снижает их радиальную миграцию по профилю. При высокой щёлочности ($\text{pH} 8,0\text{--}8,5$ и выше) металлы не только плохо мигрируют вглубь, но и часто концентрируются в тонком поверхностном слое почв/грунтов, образуя поверхностные скопления, особенно вблизи источников загрязнения (дороги, строящиеся объекты, промзоны) откуда они затем могут переноситься вместе с поступающими атмосферными осадками в нижележащие гипсометрические уровни. Исходя из этого можно говорить о том, что латеральная миграция тяжёлых металлов в городской среде существенным образом преобладает над радиальной, особенно там, где почва подвержена уплотнению, присутствует развитая сеть дорог, тротуаров, заасфальтированных участков и локальных впадин. Латеральная миграция металлов реализуется главным образом с поверхностным стоком, таянием снега, перемещением частиц почвы и пыли ветром. Омывающий поток задерживается рельефом (склоны, низины, придорожные канавы), а сами металлы задерживаются или накапливаются в поверхностных и аккумуляционных зонах – понижениях, у обочин, в руслах технических водотоков. Эта особенность объясняет концентрацию поллютантов в местах сбора воды и осадков, а также приводит к формированию ореолов загрязнения, не обнаруживаемых на участках с однородным регулярным пробоотбором. Особую роль техногенной миграции, происходящей на территории городов, является сеть дренажной канализации, которая существенным образом определяет миграцию и накопление элементов. Вымываясь потоками дождевых вод с вышележащих элементов рельефа, химические элементы перенаправляются в сеть коллекторов, расположенных, как правило, на более низких участках рельефа, где они потенциально могут аккумулироваться.

В итоге в урболандшафтах формируется довольно сложная пространственная структура миграционных потоков химических веществ, геохимических полей и ореолов загрязнения различной интенсивности и конфигурации, которую затруднительно выявить и отобразить традиционными методами исследований и картографирования, но применение современных ГИС-технологий позволяет найти новые подходы к решению данной задачи.

Методика и результаты ГИС-моделирования. Выделение потоковых ландшафтно-геохимических систем (локальных водосборов) в городской среде позволяет оценивать вероятные потоки миграции химических элементов. В гидрологическом аспекте городская среда отличается от природных территорий наличием технических сооружений, которые регулируют поверхностный сток, тем самым перенаправляя потоки миграции элементов. С технической точки зрения городская канализационная сеть состоит из ливневых траншей, труб, дренажных труб и впускных коллекторов, куда с водосбора направляется поверхностный сток. Подобное моделирование ранее производилось для территории г. Минска с целью картографирования исторической гидрографической сети [8].

На основании цифровой модели рельефа (ЦМР) и данных о локализации сети ливневой канализации на территории г. Бобруйска, полученных с генерального плана города, проведён гидрологический ГИС-анализ в среде ArcGIS Pro. Для выделения локальных водосборов на территории города использован гидрологический модуль Arc Hydro. Исходные данные на исследуемую территорию представлены ЦМР, полученной методом фотограмметрической обработки пилотируемой аэрофотосъемки с пространственным разрешением 2 м. Модель была предварительно очищена от техногенных объектов (мосты, здания и другие сооружения). Процесс (этапы) выделения водосборов представлен на концептуальной схеме моделирования (рис. 1).



Рис. 1. Концептуальная схема моделирования

Fig. 1. Conceptual scheme of modeling

На первом этапе исходная ЦМР была обработана с помощью функции Fill Sinks, которая предназначена для устранения понижений, блокирующих корректное моделирование стока и препятствующих формированию непрерывных дренажных сетей, в результате чего формируется гидрологически корректная модель рельефа (рис. 2). Этот инструмент находит и автоматически заполняет локальные понижения, которые чаще всего возникают как артефакты исходных данных из-за ошибок измерения, недоработок интерполяции или ограниченного разрешения ЦМР. Удаление ложных впадин позволяет трассировать сток воды по поверхности и корректно рассчитывать параметры водосборных бассейнов, а также строить модели потоков и водосборных площадей. Вместе с тем автоматическое заполнение понижений может вызывать эффект сглаживания рельефа, при котором частично нивелируются мелкие или даже некоторые естественные углубления, представляющие ценный морфологический или

гидрологический интерес. Именно поэтому после применения данной процедуры часто требуются дополнительный экспертный анализ и возможное ручное редактирование полученного результата, чтобы компенсировать чрезмерное сглаживание поверхности и сохранить значимые элементы природного рельефа, такие как замкнутые котловины, озёра или иные гидрографические особенности, важные с точки зрения реалистичности построенной модели.

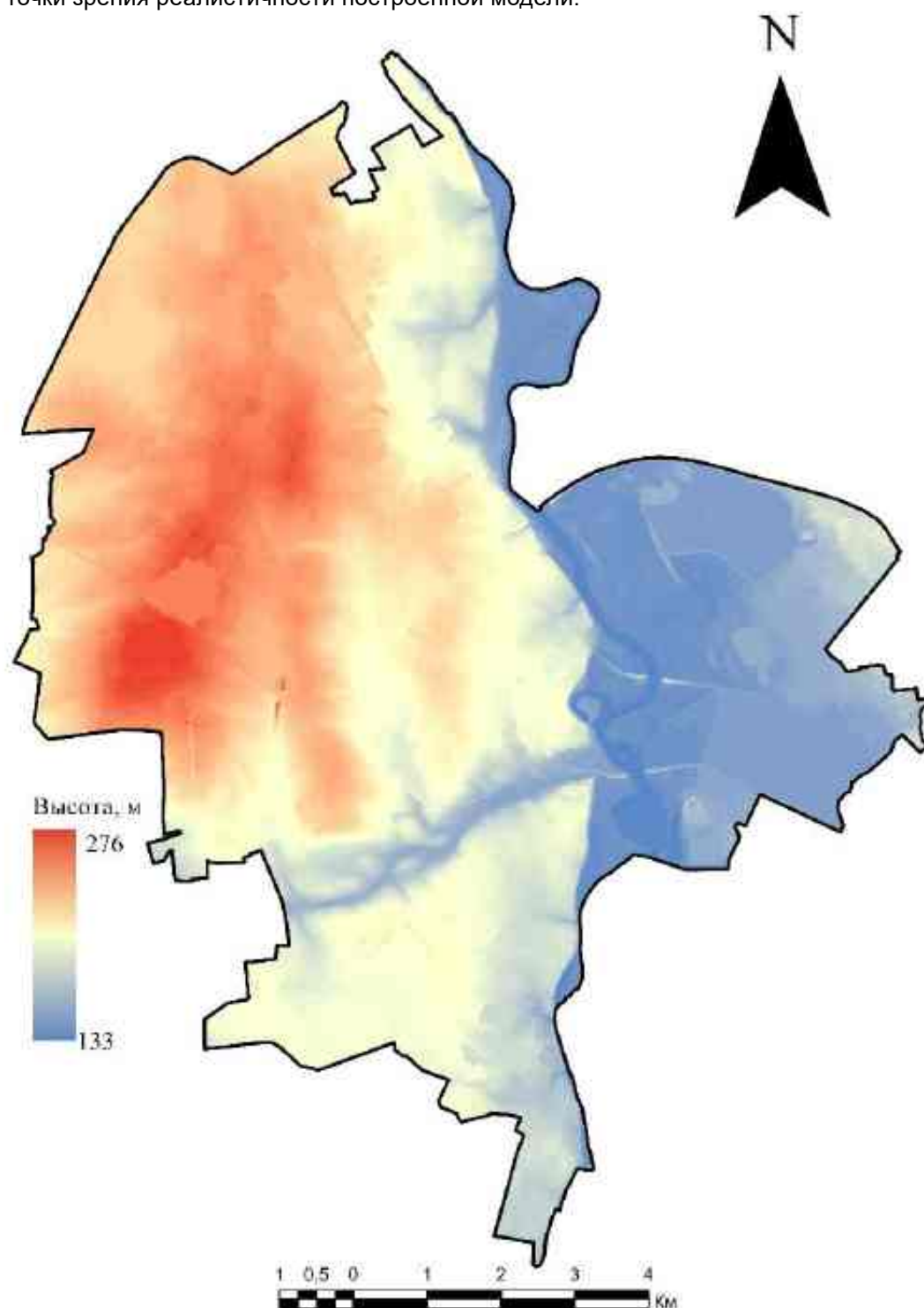


Рис. 2. Модель рельефа территории г. Бобруйска, полученная с применением функции Fill Sinks

Fig. 2. Relief model of the Bobruisk territory obtained by applying the Fill Sinks function

Вторым этапом обработки ЦМР являлось определение направления поверхностного стока для каждой ячейки растра с помощью инструмента Flow Direction, на основе полученной ранее гидрологически скорректированной модели рельефа. Эта функция реализует алгоритм, который для каждой ячейки анализирует значения высот соседей в восьми направлениях – по сторонам света и диагоналям – и вычисляет величину уклона к каждому из соседей. На основе этого анализа каждой ячейке присваивается значение, соответствующее направлению наиболее крутого спуска, т. е. туда, куда вода потенциально будет стекать естественным образом под действием гравитации. Такой подход основан на классической D8-схеме, что подразумевает возможность движения воды в одном из восьми возможных направлений. В результате работы инструмента формируется специфический растр направлений стока, где пиксели содержат коды направлений, позволяющие моделировать движение воды по поверхности и формировать впоследствии карты накопления стока, водосборных бассейнов и гидрографических сетей. Расчёт направлений учитывает не только реальные физические перепады высот, но и морфологические особенности рельефа: экспозицию склонов, форму и крутизну поверхности, что позволяет более точно симулировать распределение поверхностного стока. Такой алгоритм является стандартом при гидрологическом анализе, так как он обеспечивает баланс между производительностью вычислений и достаточной степенью детализации для большинства прикладных задач, связанных с анализом дренажных систем, выделением водоразделов и автоматическим построением речных сетей. Точность этапа определения направлений стока крайне важна для дальнейших гидрологических построений, поскольку ошибки или артефакты на этом этапе могут привести к необоснованному формированию ложных бассейнов, неправильному направлению потоков и искажению структуры водосборов в итоговой модели поверхности.

На третьем этапе гидрологического моделирования ЦМР был реализован расчёт суммарного количества ячеек, сток которых направлен в каждую конкретную ячейку растра, при помощи функции Flow Accumulation. Входными данными для этого этапа служит растр направлений стока (полученный на предыдущем этапе) позволяющий определить, от каких ячеек поверхностный сток доходит до каждой текущей ячейки по цепочке вниз по склону. Инструмент Flow Accumulation последовательно просматривает все ячейки выше по потоку для каждого пикселя, суммируя их количество и тем самым рассчитывая площадь водосбора, приходящуюся на данную точку рельефа. В результате каждая ячейка накопительного растра получает значение, соответствующее числу всех вышележащих ячеек, из которых по направлению стока вода потенциально поступает к данной точке. Полученные значения позволяют наглядно визуализировать основные линии поверхностного стока: чем больше сумма, тем выше вероятность, что эта точка расположена в долине, на русле водотока или на нижнем участке склона, принимающем воду со значительной территории. Минимальные значения, вплоть до нуля, приобретают ячейки, лежащие на водоразделах или возвышенных элементах рельефа, – эти точки не аккумулируют сток, а только отдают его, что позволяет точно определить линии водораздела и внутреннюю структуру водосборных бассейнов. Используемая на этом этапе карта аккумуляции служит основой для построения расчетной сети речных потоков: путем применения порогового значения выделяются те ячейки и участки поверхности, суммарная площадь водосбора которых превышает заданный лимит, что позволяет формировать только основные гидрографические элементы и избежать детализации малозначимых стоковых линий. Таким образом, инструмент Flow Accumulation выполняет критически важную функцию пространственного анализа ЦМР, поскольку обеспечивает определение гидрологической иерархии поверхностного стока, формирует каркас будущей речной сети и позволяет проводить дальнейший анализ морфометрических и гидрологических характеристик рельефа.

Четвёртым этапом гидрологического моделирования стало выделение и моделирование структуры речной сети с помощью инструмента Stream Definition, который формирует растр водотоков на основе ранее рассчитанной сетки аккумуляции стока. Для выделения тех ячеек, которые будут идентифицированы как элементы водотока, используется пороговое значение накопления – только те участки, чья суммарная площадь водосбора превышает установленный минимум, классифицируются как постоянный водоток. Распространённым (стандартным) в практике порогом является 1 % от общей площади рабочей территории, что обеспечивает определение действительно значимых гидрографических элементов при минимальном шуме и избыточной детализации. Использование такого критерия позволяет воспроизвести структуру речной сети, максимально приближенную к наблюдаемым в реальности условиям стока, одновременно минимизируя ложные или малозначимые ветвления и пересыхающие русла, которые могли бы появиться при менее строгом пороге. Инструмент Stream Definition принимает на вход растр аккумуляции (Flow Accumulation) и создаёт специализированный выходной слой, в котором каждому пикселю, соответствующему выявленному водотоку, присваивается уникальное значение, а оставшиеся ячейки получают значение «фонового» класса. Такой подход облегчает последующую сегментацию речной сети – выделение водотоков, их разветвлений, соединений и головных участков. Настройка порога выделения является ключевым моментом, так как допускает адаптацию анализа под

специфику изучаемой местности: повысив порог, можно выделить лишь наиболее крупные, постоянно действующие водотоки, а снизив – учесть и временные или малые ручьи. Выбранное в исследовании значение 1 % от общей площади соответствует рекомендациям авторов используемого модуля [9] и стандартной практике гидрологического моделирования, что гарантирует сравнимость и корректную интерпретацию полученных результатов во всех последующих фазах пространственного анализа.

Пятым этапом пространственного анализа представлялась сегментация водотоков с применением функции Stream Segmentation, позволяющая автоматически разбивать гидрографическую сеть на отдельные последовательные участки – так называемые сегменты. Каждый из таких сегментов формируется между ключевыми топологическими точками, такими как истоки, устья, места слияния или разветвления потоков. Для каждого сегмента при выполнении функции присваивается уникальный идентификатор, который затем сохраняется в атрибутивной таблице слоя. Это обеспечивает возможность индивидуального обращения к каждому участку при последующем анализе гидрологической сети, включая вычисление характеристик отдельных сегментов – длины, среднего уклона, площади водосбора, а также моделирование связанных с ними экологических и потоковых параметров. Разделение на сегменты с уникальными идентификаторами существенно облегчает задачи тематической визуализации: становится возможным дифференцировать участки по цвету в зависимости от состояния, источников загрязнения, потенциальной нагрузки или иных расчетных индикаторов, а также интегрировать эти данные с другими пространственными информационными слоями. Благодаря такому подходу появляются новые возможности для детального картографирования, экологического моделирования и комплексного анализа пространственной организации потоковой сети.

На шестом этапе анализа гидрографической сети с помощью функции Catchment Grid Delineation производилось построение пространственной сетки водосборных территорий, представляющей собой регулярное покрытие исследуемого района ячейками. Эта функция автоматически оценивает направление и площадь стока для каждого сегмента водотока, определённого на предыдущих этапах, используя данные ЦМР и структуру потоковой сети. Каждая ячейка в данной сетке анализируется на предмет того, к какому сегменту водотока направлен основной поверхностный сток с её территории. На основании этого анализа ячейке присваивается уникальный код (идентификатор), который соответствует определённому водосборному участку и, следовательно, «привязывает» её к соответствующему сегменту русловой сети. В результате формируется детализированная модель водосборов, где видно, какие части территории обеспечивают поступление стока в тот или иной участок (сегмент) потоковой сети. Такая пространственная детализация необходима для расчёта площади каждого микробассейна, пространственной интерпретации гидрологических и геохимических процессов, визуализации потоков вещества и загрязняющих компонентов, а также моделирования сценариев распространения загрязнения в системе водотоков. Данный этап интегрирует результаты предыдущей сегментации потоков и позволяет увязать линейные элементы гидросети с поверхностным покровом и его функциональными зонами, что важно для правильной последующей интерпретации пространственных данных.

Седьмой этап моделирования заключался в обработке и векторизации полученной сетки водосборов с использованием функции Catchment Polygon Processing. Эта функция переводит исходный растровый слой, где каждая ячейка имеет код водосборного участка, в векторные объекты, объединяя все соседние ячейки с одинаковыми значениями в единый полигон. По ходу операции автоматически устраняются мелкие артефакты – небольшие ошибочные участки, которые могли образоваться в результате технических неточностей построения сетки или особенностей микрорельефа. Итогом становится компактная карта водосборов, реализованная в виде набора корректных замкнутых векторных полигонов, каждый из которых соответствует своему сегменту территории. Однако автоматическая генерация таких границ нередко приводит к появлению фрагментов с неестественно прямыми или угловатыми линиями, что отчётливо видно в восточной части города (рис. 3), особенно на участках речных долин и в пределах сложного рельефа, что связано с ограничениями цифровой модели местности, сглаживанием и разрешением исходных данных. Поэтому после завершения автоматизированного этапа выполнялась ручная доработка – границы полигонов водосборов корректировались и уточнялись, в первую очередь там, где они пересекают речные долины, огибают русла или существенно расходятся с морфологическими особенностями территории. Для правильной корректировки была построена ЦМР с проведёнными тальвегами, благодаря которым можно более достоверно провести границу. Такая доработка позволяет добиться максимального соответствия полученной структуры реальному положению природных водоразделов.

После данного этапа, если бы территория была естественной, не нарушенной, можно было бы остановиться на этом, но так как изучаемая территория в значительной степени преобразована, необходимо учитывать искусственную зарегулированность поверхностного стока, о чем говорилось ранее. Естественные водосборные границы, выделенные по ЦМР, корректировали с учётом наличия городской

дренажно-коллекторной инфраструктуры. Для этого локальные водосборы, выделенные ранее на базе ЦМР и направления поверхностного стока, подвергали повторной классификации: если в пределах водосборного участка обнаруживали трубы только одного коллектора, то весь такой участок полностью относили к данному коллектору и присваивали ему уникальный идентификатор коллектора (порядковый номер). Также производили ручную корректировку границы водосбора с учётом дренажной канализации. Такой подход позволяет максимально адекватно интегрировать данные гидрологической модели с объектами городской инфраструктуры, так как именно ручная доработка на современном этапе развития ГИС даёт более адекватный результат.

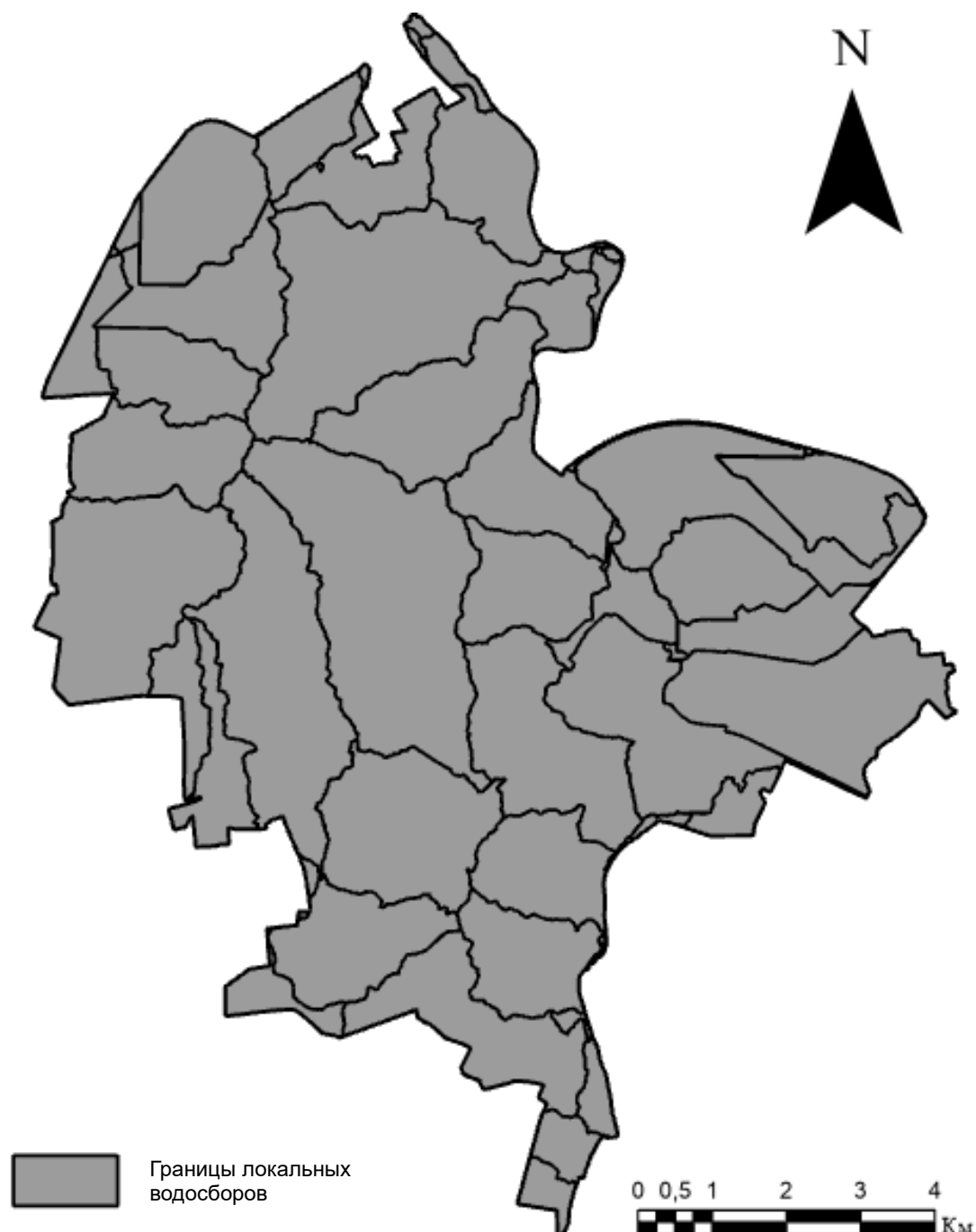


Рис. 3. Схема локальных водосборов на территории г. Бобруйска, полученная в результате автоматической генерации границ водосборов (без ручной корректировки)

Fig. 3. The scheme of local watersheds of the Bobruisk territory obtained as a result of the automatic generation of watershed boundaries (without manual adjustments)

В процессе работы обязательно анализировали направления поверхностного стока и устройство улично-дорожной сети, так как именно дороги, тротуары и связанные с ними искусственные водоотводящие конструкции часто становятся фактическими водосборами для коллекторной системы, направляя сток с обширных территорий в заданные приёмные точки, что особенно выражено при ливневых осадках, когда практически все взвешенные и растворенные вещества уносятся в коллекторные сети. В результате проведённого пространственного анализа и картографирования было выделено 11 водосборных бассейнов, а также несколько участков с неорганизованным поверхностным стоком. Последние участки характеризуются либо внутренним стоком, приводящим к локальной аккумуляции воды и загрязняющих веществ (например: в низинах, зелёных зонах, на неасфальтированных площадях), либо постепенным инфильтрационным просачиванием воды в грунт, что особенно актуально в районах с развитой задернованной поверхностью.

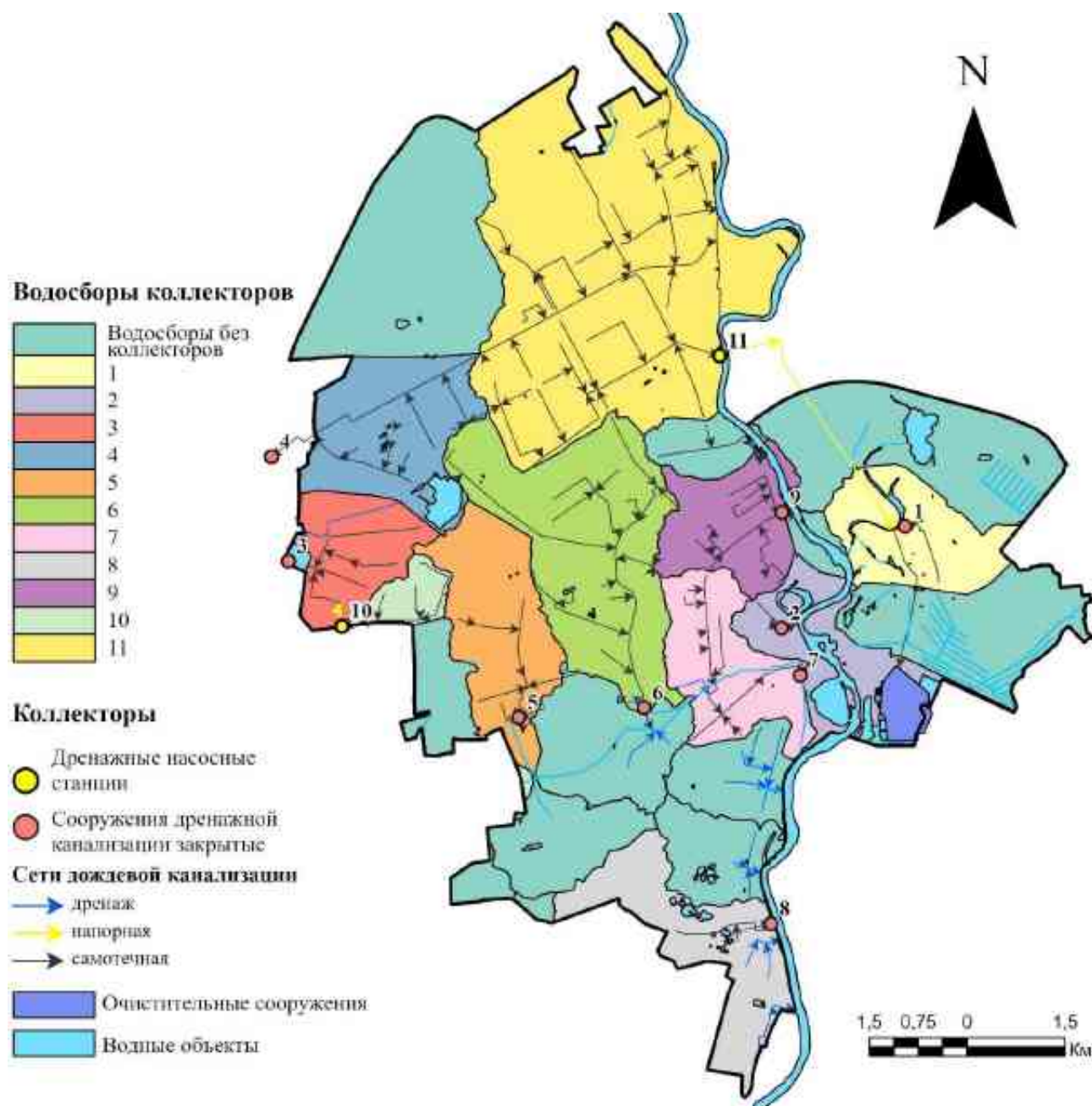


Рис. 4. Современная структура водосборных бассейнов на территории г. Бобруйска с учётом сети дождевой канализации

Fig. 4. The current structure of watersheds of the Bobruisk territory, taking into account the storm drainage network

С точки зрения геохимической структуры урболандшафтов полученная модель позволяет чётко отделить зоны интеграции техногенных потоков вещества – такие участки функционируют как мощные интеграторы смешанных стоков, объединяя фрагменты с различным генезисом почвообразующих пород и химическим составом почвенных горизонтов.

Полученная модель современной структуры водосборных бассейнов с учётом сети дождевой канализации (рис. 4) позволяет не только визуализировать степень зарегулированности поверхностного стока, но и проанализировать специфику проявления техногенных процессов водной миграции и аккумуляции тяжёлых металлов и других загрязняющих веществ в условиях городской среды. Соответственно, выделенные водосборные бассейны на территории города можно рассматривать в качестве *техногенных потоковых ландшафтно-геохимических систем*.

Таким образом, пути водной миграции тяжёлых металлов (в ионной или взвешенной форме [10]) в городах с развитой коллекторной сетью коренным образом отличаются от урболандшафтов с незарегулированным стоком, что определяет формирование специфических паттернов накопления поллютантов. В итоге техногенной трансформации стока именно коллекторные сети приобретают ведущую роль в переносе тяжёлых металлов и других загрязняющих веществ, которые в итоге могут накапливаться в зонах воздействия городских очистных сооружений. Последние являются одним из наиболее проблемных мест и могут оказывать существенное влияние на окружающую среду [11].

К городским очистным сооружениям Бобруйска стекаются воды, в том числе с самой крупной промышленной зоны города – территории завода «Белшина». Это приводит к высокой концентрации техногенного стока, в составе которого может содержаться значительная доля тяжёлых металлов и органических загрязнителей, связанных с производственным циклом предприятия (каучук, сажа и др.). Сток направляется по напорной канализации к очистным сооружениям на востоке города, что делает именно этот водосбор ключевой зоной поступления и аккумуляции загрязняющих веществ.

Полученная ГИС-модель стока в перспективе позволит разрабатывать сети пробоотбора с учётом локальных особенностей миграции загрязняющих веществ, устанавливать возможные источники загрязнения, выявлять пути миграции поллютантов и места локализации техногенных геохимических аномалий и в конечном счете принимать оперативные меры по устранению или минимизации негативных последствий.

Заключение. Традиционные регулярные схемы пробоотбора, применяемые для мониторинга городских почв, часто не учитывают рельефно-гидрологические особенности городских территорий и инженерную инфраструктуру. Более точный анализ возможен при делении территории на потоковые ландшафтно-геохимические системы, сформированные не только природными, но и техногенными процессами. ГИС-анализ, основанный на цифровой модели рельефа и интеграции данных о дренажных системах, позволяет выделить водосборные участки, отражающие реальные потоки миграции загрязняющих веществ в городах.

В пределах г. Бобруйска выделено 11 водосборных бассейнов, соответствующих дренажным коллекторам, а также участки с неорганизованным поверхностным стоком. Каждый из таких участков функционирует как самостоятельная потоковая ландшафтно-геохимическая система – интегратор поступающих с поверхности загрязняющих веществ, включая тяжёлые металлы и органические поллютанты. Взаимосвязь рельефа и городской инфраструктуры определяет направления техногенных миграций: загрязняющие вещества поступают в ливневые коллекторы, где могут концентрироваться, аккумулироваться и далее транспортироваться к городским очистным сооружениям, формируя локальные геохимические аномалии.

Особенности миграции загрязняющих веществ в урболандшафтах в значительной мере определяются техногенным влиянием, проявляющемся в трансформации рельефа, сооружении коллекторных систем, что ведёт к преобладанию латеральной (горизонтальной) миграции над радиальной.

Автоматизированное выделение водосборов и их последующая экспертная корректировка позволяют максимально приближённо отразить реальные техногенные потоки вещества, что важно для мониторинга техногенных токов загрязнения и локализации мест накопления. Полученная модель может использоваться для оптимизации системы экологического контроля, корректировки пробоотборных сеток с учётом реальных путей миграции загрязняющих веществ, а также для проектирования инженерных решений по управлению стоками и снижению техногенных нагрузок на городские очистные сооружения.

ГИС-моделирование потоковых ландшафтно-геохимических систем интегрирует природную морфологию и антропогенную инфраструктуру города. Такой подход позволяет выявлять функциональные зоны накопления и миграции загрязняющих веществ, способствует более глубокому пониманию геохимии урболандшафтов, осознанному планированию очистных мероприятий и научно обоснованной интеграции экологических и инженерных данных для повышения качества городской среды и здоровья населения.

Список использованных источников

1. Demetriades, A. Urban Topsoil Geochemical Mapping Manual (URGE II). EuroGeoSurveys / A. Demetriades, M. Birke. – Brussels, 2015. – 52 p.
2. Хомич, В. С. О методах изучения и оценки загрязнения почв в Беларуси / В. С. Хомич // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 98–106.
3. Глазовская, М. А. Геохимические основы типологии и методики исследования природных ландшафтов / М. А. Глазовская. – М. : Изд-во МГУ, 1964. – 229 с.
4. Курбатова, А. С. Ландшафтно-экологические основы формирования градостроительных структур / А. С. Курбатова. – М. : Маджента, 2004. – 400 с.
5. Глазовская, М. А. Геохимические барьеры в почвах равнин, их типология, функциональные особенности и экологическое значение / М. А. Глазовская // Вестник Московского университета. Серия 5, География. – 2012. – № 1. – С. 8–14.
6. Кухлевский, Е. А. Анализ пространственного распределения кислотности почв г. Бобруйска / Е. А. Кухлевский, А. А. Карпиченко // ГИС-технологии в науках о Земле : материалы респ. науч.-практ. семинара студентов и молодых ученых, Минск, 16 нояб. 2022 г. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: А. А. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Мн. : БГУ, 2022. – С. 187–190.
7. Путилина, В. С. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции : аналит. обзор / В. С. Путилина, И. В. Галицкая, Т. И. Юганова. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2009. – 155 с.
8. Овчарова, Е. П. Оценка трансформации пространственной структуры водосборов урбанизированной территории с применением гидрологического моделирования в ГИС на примере г. Минска / Е. П. Овчарова, С. В. Алисиевич, Н. В. Ковальчик // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2025. – № 1. – С. 24–34.
9. Maidment, D. Arc Hydro: Overview of Terrain Preprocessing Workflows / D. Maidment, D. Djokic D. – Redlands, CA : Esri, 2019. – 18 p.
10. Груздков, Д. Ю. Оценка миграции тяжелых металлов в почвах / Д. Ю. Груздков, Л. А. Ширкин, Т. А. Трифонова // Вестник Московского университета. Серия 17, Почвоведение. – 2009. – № 4. – С. 40–45.
11. Басалай, Е. Н. Влияние городских очистных сооружений на природные воды и почвы / Е. Н. Басалай, В. С. Хомич. – Мн. : Бел. навука, 2025. – 201 с.

References

1. Demetriades A., Birke M. Urban Topsoil Geochemical Mapping Manual (URGE II). EuroGeoSurveys. Brussels Publ., 2015, 52 p.
2. Khomich V. S. O metodah izucheniya i ocenki zagryazneniya pochv v Belarusi [About the methods of studying and assessing soil pollution in Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 98–106. (in Russian)
3. Glazovskaya M. A. *Geohimicheskie osnovy tipologii i metodiki issledovaniya prirodnih landshaftov* [Geochemical foundations of typology and methods for studying natural landscapes]. Moscow, MSU Publishing House, 1964, 229 p. (in Russian)
4. Kurbatova A. S. *Landshaftno-ekologicheskie osnovy formirovaniya gradostroitel'nyh struktur* [Landscape-ecological foundations of forming urban structures]. Moscow, Madzhenta Publ., 2004, 400 p. (in Russian)
5. Glazovskaya M. A. *Geohimicheskie bar'ery v pochvah ravnin, ih tipologiya, funktsional'nye osobennosti i ekologicheskoe znachenie* [Geochemical barriers in plain soils, their typology, functional features, and ecological significance]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya = Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, 2012, no. 1, pp. 8–14. (in Russian)
6. Kukhlevsky E. A., Karpichenko A. A. Analiz prostranstvennogo raspredeleniya kislotnosti pochv g. Bobrujska [Analysis of the spatial distribution of soil acidity in Bobruisk]. *GIS-tehnologii v naukah o Zemle: materialy respublikanskogo nauchno-prakticheskogo seminar studentov i molodyh uchenykh, Minsk, 16 noyabrya 2022 g.* [GIS technologies in Earth sciences: Proceedings of the republican scientific and practical seminar of students and young scientists, Minsk, November 16, 2022]. Belarusian State University; ed. board: A. A. Sazonov (ed.-in-chief) [et al.], Minsk, BSU Publ., 2022, pp. 187–190. (in Russian)
7. Putilina V. S., Galitskaya I. V., Yuganova T. I. *Adsorbtsiya tyazhelykh metallov pochvami i gornymi porodami. Harakteristiki sorbenta, usloviya, parametry i mekhanizmy adsorbtsii: analiticheskij obzor* [Adsorption of Heavy Metals by soils and rocks. sorbent characteristics, conditions, parameters, and adsorption mechanisms: Analytical review]. Novosibirsk, GPNTPB SB RAS Publ., 2009, 155 p. (in Russian)
8. Ovcharova E. P., Alisevich S. V., Kovalchik N. V. *Ocenka transformatsii prostranstvennoy struktury vodosborov urbanizirovannoy territorii s prime-neniem gidrologicheskogo modelirovaniya v GIS na primere g. Minska* [Assessment of the transformation of the spatial structure of watersheds in urbanized areas using hydrological modeling in GIS (case study of Minsk)]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya = Journal of Belarusian State University. Geography. Geology*, 2025, no. 1, pp. 24–34. (in Russian)
9. Maidment D., Djokic D. Arc Hydro: Overview of Terrain Preprocessing Workflows. Redlands, CA, Esri Publ., 2019, 18 p.

10. Gruzdkov, D. Yu., Shirkin L. A., Trifonova T. A. *Ocenka migracii tyazhelyh metallov v pochvah* [Assessment of heavy metal migration in soils]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17, Pochvovedenie = Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science*, 2009, no. 4, pp. 40–45. (in Russian)
11. Basalai E. N., Khomich V. S. *Vliyanie gorodskih ochestnyh sooruzhenij na prirodnye vody i pochvy* [Impact of urban wastewater treatment facilities on natural waters and soils]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2025, 201 p. (in Russian)

Информация об авторах

Кухлевский Егор Александрович – аспирант кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: kuhljevskiegor@gmail.com

Карпиченко Александр Александрович – кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой физической географии мира и образовательных технологий факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: karpi@bsu.by

Information about the authors

Egor A. Kuhljevski – Postgraduate student at the Department of Soil Science and Geographic Information Systems, Faculty of Geography and Geoinformatics, Belarusian State University (16, Leningradskaya St., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: kuhljevskiegor@gmail.com

Aliaksandr A. Karpichenka – Ph. D. (Geography), Associate Professor, Head of the Department of Physical Geography of the World and Educational Technologies, Faculty of Geography and Geoinformatics, Belarusian State University (16, Leningradskaya St., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: karpi@bsu.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-160-171>
УДК 550.4+504.5(476)

Поступила в редакцию 21.05.2026
Received 21.05.2026

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И СНЕЖНОГО ПОКРОВА В г. МИНСКЕ

Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. На основе результатов мониторинга химического состава атмосферных осадков и снежного покрова на экспериментальной площадке Института природопользования НАН Беларуси охарактеризованы особенности их состава в г. Минске по результатам наблюдений в 2023 г.

Среднегодовые концентрации в атмосферных осадках составили: серы – 0,42 мг S/л, окисленного азота – 0,31 мг N/л, восстановленного азота – 0,45 мг N/л. В снежном покрове за зимний период 2022–2023 гг. соответствующие значения достигли 0,31 мг S/л; 0,35 и 0,22 мг N/л. Атмосферные осадки характеризовались преимущественно нейтральной реакцией среды (среднее значение pH 6,12) и пониженной минерализацией по сравнению с предыдущими годами.

Выявлена синхронность внутригодовой динамики соединений серы и азота, обусловленная общностью источников их поступления. Показано влияние метеорологических условий на вариабельность концентраций, а также значительная роль локальных антропогенных факторов в формировании химического состава снежного покрова.

Сопоставление с данными станций Программы ЕМЕП показало, что уровни содержания основных компонентов соответствуют диапазону значений для стран-соседей. Подтверждён долгосрочный тренд снижения содержания соединений серы и азота при сохранении межгодовой изменчивости.

Ключевые слова: атмосферные осадки; атмосферные выпадения; азот; сера; закисление; эвтрофирование.

Для цитирования. Кокош Ю. Г., Кудревич М. А. Гидрохимические особенности атмосферных осадков и снежного покрова в г. Минске // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 160–171.

HYDROCHEMICAL PECULIARITIES OF ATMOSPHERIC PRECIPITATES AND SNOW COVER IN MINSK

Yu. G. Kokosh, M. A. Kudrevich

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The study presents the results of monitoring the chemical composition of atmospheric precipitation and snow cover at the experimental site of the Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus in Minsk in 2023.

The volume-weighted mean concentrations in precipitation were 0.42 mg S/L for sulfur, 0.31 mg N/L for oxidized nitrogen, and 0.45 mg N/L for reduced nitrogen. In the snow cover during the winter period of 2022–2023, the corresponding values were 0.31, 0.35, and 0.22 mg/L. Atmospheric precipitation was characterized by predominantly neutral conditions (mean pH of 6.12) and reduced mineralization compared to previous years.

A synchronous intra-annual variation of sulfur and nitrogen compounds was identified, indicating common emission sources. The influence of meteorological conditions on concentration variability was demonstrated, along with the significant role of local anthropogenic factors in shaping the chemical composition of snow cover.

Comparison with data from EMEP monitoring stations showed that the concentrations of major components fall within the range observed in neighboring countries. A long-term decreasing trend in sulfur and nitrogen content was confirmed, despite interannual variability.

Keywords: precipitation; atmospheric deposition; nitrogen; sulfur; acidification; eutrophication.

For citation. Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. Hydrochemical peculiarities of atmospheric precipitates and snow cover in Minsk // *Nature Management*, 2026. no. 1, pp. 160–171.

Введение. Атмосферные осадки и снежный покров являются важнейшими компонентами окружающей среды, отражающими состояние атмосферного воздуха и уровень антропогенного воздействия на урбанизированные территории. Химический состав осадков формируется под влиянием природных факторов и техногенных источников загрязнения, включая выбросы промышленности, энергетики, транспорта, а также трансграничный перенос загрязняющих веществ. Исследование химического состава атмосферных осадков и снежного покрова позволяет получать информацию о поступлении химических элементов и соединений из атмосферы, оценивать масштабы загрязнения и выявлять особенности миграции загрязняющих веществ в городской среде.

Особую актуальность такие исследования приобретают для крупных городов, где высокая плотность населения, интенсивное развитие промышленности и транспортной инфраструктуры способствуют формированию сложной экологической обстановки. Город Минск как крупнейший промышленный, административный и транспортный центр Республики Беларусь подвержен значительной антропогенной нагрузке, что может оказывать влияние на химический состав атмосферных выпадений. Атмосферные осадки и снежный покров в условиях города служат индикаторами аэротехногенного загрязнения, а их анализ позволяет оценивать уровень накопления макрокомпонентов.

В отличие от жидких осадков, снег способен накапливать аэрозоли, пыль, продукты сгорания топлива и другие примеси, обеспечивая интегральную характеристику атмосферного загрязнения за продолжительный промежуток времени. Анализ его химического состава позволяет выявлять пространственные различия загрязнения, устанавливать основные источники поступления загрязняющих веществ и оценивать потенциальные экологические риски для почв, поверхностных и грунтовых вод в период снеготаяния.

Несмотря на значительное количество исследований в области химии атмосферных осадков, для г. Минска сохраняется необходимость комплексной оценки современного состояния атмосферных выпадений с учётом изменений структуры выбросов, климатических факторов и роста урбанизационной нагрузки. Особую проблему представляет закисление осадков, способных оказывать негативное воздействие на городские экосистемы и здоровье населения.

Таким образом, изучение химического состава атмосферных осадков и снежного покрова позволяет оценивать уровень атмосферного загрязнения, выявлять тенденции его изменения, совершенствовать экологический мониторинг и разрабатывать меры по снижению антропогенного воздействия на окружающую среду.

Интенсивные исследования атмосферных осадков проводятся во всем мире в течение последних 30 лет в рамках многих национальных и международных программ, в частности, Совместной программы наблюдений и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих веществ в Европе (Программы ЕМЕП [1–6]). В то же время основная часть наблюдений за осадками проводится на фоновых территориях, в связи с чем вопросы изменений химического состава осадков в городах остаются недостаточно изученными.

С 1999 г. Институтом природопользования НАН Беларуси организована площадка наблюдения за химическим составом атмосферных осадков и снежного покрова в г. Минске. Постоянные исследования на ней начали проводить, начиная с 2002 г. В ранее опубликованных работах [7–9] обобщены полученные данные и проанализированы тренды химического состава атмосферных осадков за период с 2002 по 2019 г. и за 2018–2022 гг. Данная статья посвящена анализу особенностей химического состава атмосферных осадков и снежного покрова на территории г. Минска в 2023 г. по сравнению с предыдущими периодами. Выбор 2023 г. обусловлен несколькими причинами. Это последний завершённый год наблюдений, для которого сформирован полный массив данных по атмосферным осадкам и снежному покрову без пропусков; характеризовался наличием достаточно длительного устойчивого периода залегания снежного покрова по сравнению с последующим зимними периодами 2024 и 2025 г.

Цели работы – изучить внутригодовую динамику компонентов химического состава атмосферных осадков и снежного покрова во взаимосвязи с метеоусловиями; оценить интенсивность атмосферных выпадений.

Материалы и методы исследований. Для изучения различных аспектов химического состава атмосферных осадков и снежного покрова на урбанизированных территориях Институтом природопользования НАН Беларуси на его территории в северо-восточной части г. Минска организована экспериментальная площадка. Первые наблюдения на данной сети выполнены в 1996 г. [7], регулярные наблюдения за атмосферными осадками на экспериментальной площадке начали проводить, начиная с 2002 г., за снежным покровом – с 2004 г. [8]. При формировании программы наблюдений учитывали рекомендации Глобальной службы атмосферы (ГСА) [10] и Программы ЕМЕП [11].

На площадке проводили наблюдения за количеством выпадающих осадков, изучали динамику мощности снежного покрова, контролировали химический состав атмосферных осадков и снеговых вод, метеоусловия. Основной период, за который отбирали пробы осадков, в соответствии с рекомендациями Программы ЕМЕП – неделя. Данный срок позволяет получить существенно более полную информацию о химическом составе осадков, чем при традиционном отборе месячных проб.

Опробование атмосферных осадков проводили при помощи осадкомера конструкции NILU. Для исключения значительного влияния испарения в период накопления пробы в тёплое время года использовали летний вариант осадкосборника.

Отбор проб снежного покрова осуществляли согласно методическим указаниям с помощью стандартного металлического весового снегомера ВС-43, заглубляемого на всю толщину снежного покрова до поверхности земли. После этого трубу из снега извлекали, поддерживая снизу лопаткой. Нижнюю часть снегомера тщательно очищали от частиц грунта. Отбирали сводные пробы весом 1,5–2,5 кг из 2–7 кернов в зависимости от высоты снежного покрова.

Образцы снега растапливали при комнатной температуре, талую воду фильтровали через фильтр «синяя лента». По осадку, полученному на фильтре, определяли количество взвешенных частиц в отобранной пробе, а в фильтрате определяли следующие показатели: SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , pH.

Содержание хлоридов определяли с помощью титриметрического метода с нитратом серебра (СТБ 17.13.05-39-2015), гидрокарбонат-ионов – титриметрически с использованием тетраборнокислого натрия (ГОСТ 31957-2012), сульфатов – турбидиметрически (СТБ 17.13.05-42-2015), натрия и калия – методом пламенной фотометрии (МВИ.МН 2140-2004), кальция и магния – титриметрически (СТБ 17.13.05-46-2016) и методом атомно-абсорбционной спектроскопии, величину pH – потенциометрическим методом (СТБ ISO 10523-2009), удельную электропроводность – с использованием кондуктометра. Контроль качества выполняемых измерений проводили в соответствии с принятой в лаборатории процедурой внутреннего контроля качества и рекомендаций программ ГСА и ЕМЕП (на основе вычисления ионного баланса) [10, 11], а также путём участия в лабораторных сличительных испытаниях, проводимых Центром обеспечения качества и научной деятельности ГСА.

Экспериментальные результаты сопоставлены с результатами измерений на станциях Программы ЕМЕП в Европе.

В 2023 г. на экспериментальной площадке во дворе Института природопользования НАН Беларуси отобрано 44 пробы атмосферных осадков. Средний объем пробы составил 505 мл с диапазоном 10–2250 мл. В пробах атмосферных осадков объёмом менее 50 мл определены только значения кислотности и удельной электропроводности. Помимо атмосферных осадков во дворе Института природопользования НАН Беларуси отобраны 9 проб снежного покрова.

Данные результатов химического анализа проб атмосферных осадков и снежного покрова, а также наблюдений за метеоусловиями и состоянием снежного покрова сформированы в базу данных, которая создана в программах MS Access 2007 и MS Excel 2007.

На основании результатов химико-аналитических испытаний рассчитаны основные статистические параметры, а также среднемесячные и среднегодовые взвешенные концентрации и выпадения за исследуемый период.

Результаты и их обсуждение. Химический состав атмосферных осадков в 2023 г. В 2023 г. на экспериментальной площадке Института природопользования НАН Беларуси выпало 707,6 мм осадков. Как и в предыдущие годы, наибольшее количество осадков выпало в летний период и составило 36 % суммы годовых осадков, наименьшее – в весенний (18 %).

В разрезе месячных значений суммы осадков на экспериментальной площадке колебались от 5,4 до 161,2 мм со средним значением 59,0 мм. Наибольшее количество осадков выпало в январе (69,0 мм), марте (98,4), июле (161,2) и октябре – ноябре (70,5 и 76,1 мм соответственно); в эти месяцы их значения в 1,3–2,4 раза превышали климатическую норму. Наименьшие месячные суммы осадков зафиксированы в апреле – мае (22,6 и 5,4 мм соответственно) и сентябре (32,8 мм). Месячные данные по осадкам на станции Минск хорошо соотносятся с данными на экспериментальной площадке. Наибольшее расхождение получено в августе.

В зависимости от объёма пробы, необходимого для химико-аналитического определения гидрохимического состава, проанализированы 42 пробы. Статистические характеристики содержания основных ионов, кислотности, электропроводности атмосферных осадков на постоянной площадке в 2023 г. приведены в табл. 1.

Таблица 1. Статистические параметры гидрохимического состава атмосферных осадков на постоянной экспериментальной площадке в г. Минске, 2023 г., мг/л**Table 1. Statistical parameters of the hydrochemical composition of atmospheric precipitation at a permanent experimental site in Minsk, 2023, mg/l**

Параметр	$\text{SO}_4^{2-}(\text{S})$	Cl^-	$\text{NO}_3^-(\text{N})$	HCO_3^-	$\text{NH}_4^+(\text{N})$	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	pH	Электропроводность, мкСм/см
Среднее	0,42	1,93	0,31	3,33	0,45	0,87	0,83	0,74	0,44	6,12	26,10
Медиана	0,45	1,79	0,28	3,37	0,42	0,65	0,60	0,61	0,28	6,16	22,20
Стандартное отклонение	0,21	1,11	0,16	2,55	0,25	0,75	0,79	0,50	0,47	0,33	13,3
Дисперсия выборки	0,05	1,22	0,03	6,50	0,06	0,56	0,62	0,25	0,22	0,11	177,9
Минимум	н. о.*	0,20	0,03	0,34	0,09	0,05	0,10	0,08	0,12	5,08	9,9
Максимум	0,85	4,42	0,70	12,28	1,01	2,96	3,85	1,94	2,50	6,89	77,3
Количество проб	39	30	39	27	39	30	30	28	28	42	40
Коэффициент вариации, %	50,7	57,3	53,1	76,5	57,1	86,1	94,6	67,3	107,6	5,3	51,1

* н. о. – ниже предела обнаружения метода.

Средняя минерализация атмосферных осадков в 2023 г. составила 9,2 мг/л, что ниже показателей предыдущих трёх лет (31,0; 18,3; и 12,3 мг/дм³). В то же время суммарное количество осадков в 2020–2023 гг. сохранялось на относительно стабильном уровне (580–708 мм), что свидетельствует о снижении суммарной аэрозольной нагрузки на атмосферу. Это может быть связано как с уменьшением выбросов загрязняющих веществ, так и с изменениями метеорологических условий, способствующих более эффективному вымыванию загрязнителей.

Отмечено существенное колебание показателя минерализации недельных проб – от 2,4 до 26,5 мг/л. Минимальные значения минерализации недельных проб (2,4 и 2,6 мг/дм³) обнаружены в пробах за период с 23 по 30 января и с 28 августа по 4 сентября 2023 г., максимальное – (26,5 мг/дм³) в пробе за период с 6 по 13 ноября 2023 г. Разброс значений составил 55 %. По данным Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС) в 2023 г. минерализация атмосферных осадков в городах Беларуси изменялась от 7,6 мг/л в Мозыре до 27,6 мг/л в Березино; в Минске данный показатель составил 12,0 мг/л [12, 13].

Значения удельной электропроводности в 2023 г. варьировали в пределах 9,9–77,3 мкСм/см (см. табл. 1). Среднее значение показателя – 26,1 мкСм/см, что в 1,3 раза ниже показателя прошлого года (33,0 мкСм/см). Вариабельность значений невысокая – 51%. На станции Высокое среднее значение удельной электропроводности в 2023 г. составило 34,2 мкСм/см и варьировало от 12,0 до 52,0 мкСм/см [12, 13]. Минимальные показатели электропроводности на экспериментальной площадке характерны для проб за периоды с 17 по 24 июля, с 24 по 31 июля и с 7 по 14 августа 2023 г., когда выпало наибольшее количество осадков за неделю. Максимальные значения электропроводности получены в пробах за периоды с 21 по 28 августа и с 25 сентября по 2 октября 2023 г. На станции Высокое в эти периоды также фиксировались повышенные значения (41,0–52,0 мкСм/см).

Среднее значение pH атмосферных осадков составило 6,12, что превышает равновесную величину для атмосферных осадков (5,6). Кислотность варьировала в пределах 5,08–6,89. В 5 % проб значения были ниже 5,6. Наиболее кислотные осадки выпадали в зимний период 2023 г. (pH 5,08–6,28 со средним значением 5,81), средние значения pH в остальные сезоны составили 6,21–6,29. Коэффициент вариации значений был низким (5,3 %), что свидетельствует о достаточно однородном внутригодовом распределении содержания данного компонента.

В городах Беларуси среднегодовые значения pH в 2023 г. находились в пределах от 5,64 до 6,44. По данным НСМОС в г. Минске выпадали только нейтральные осадки [13].

В г. Высокое значения водородного показателя (рН) атмосферных осадков варьировались в диапазоне от 5,80 до 6,80, при среднем годовом 6,33, следовательно, в течение года выпадали нейтральные осадки. В г. Мстиславле диапазон значений рН был более широким и варьировался от 5,03 до 7,65, при среднем годовом 6,43; в г. Браславе – от 4,79 до 5,99, при среднем годовом 5,44 [12, 13].

Рассчитаны статистические характеристики химических элементов атмосферных осадков (табл. 1). Для всех исследуемых элементов отмечается разброс значений выше среднего. Наиболее высокие коэффициенты вариации получены для ионов калия и магния (95 и 108 % соответственно). Стандартное отклонение содержания ионов магния в атмосферных осадках выше среднего значения.

В 2023 г. содержание серы в недельных пробах осадков варьировало в пределах н. о. – 0,85 мг S/л со средним значением 0,42 мг S/л. Доля сульфатов в общей минерализации проб составила 8,9 %, что соотносится с данными НСМОС по станции Колодищи (доля сульфатов 8 %) [12, 13]. Наибольшие значения получены в пробах, отобранных в конце февраля, марте и первой половине апреля: 27.02–06.03 (0,75 мг S/л), 13.03–20.03 (0,76), 20.03–27.03 (0,71) и 10.04–17.04 (0,85 мг S/л). Минимальные значения (0,0–0,19 мг S/л) зафиксированы во второй половине января (в пробах, отобранных за период 16.01–23.01, 23.01–30.01), конце июля (24.07–31.07), середине сентября (11.09–18.09), конце октября (23.10–30.10) и в конце ноября (20.11–27.11).

Содержание нитрат-ионов в 2023 г. находилось в диапазоне 0,03–0,70 мг N/л со средним значением 0,31 мг N/л. Наибольшие значения получены в недельных пробах за период 06.02–13.02 (0,60 мг N/л), 20.03–27.03 (0,71 мг N/л) и 13.11–20.11 (0,67 мг N/л). Наименьшие значения зафиксированы в конце июля (27.07–31.07; 0,028 мг N/л) и первой половине ноября (06.11–13.11; 0,049 мг N/л).

Среднее содержание ионов аммония в 2023 г. составило 0,45 мг N/л и варьировало в пределах от 0,09 до 1,01 мг N/л. Наименьшие значения зафиксированы в конце июля (24.07–31.07), начале августа (07.08–14.08) и второй половине октября (16.10–23.10 и 23.10–30.10); наибольшие значения – в пробах, отобранных в конце февраля – начале марта (27.02–06.03) (0,96 мг N/л), середине апреля (10.04–17.04 – 0,87 мг N/л), ноябре (13.11–20.11 – 1,01 мг N/л) и середине декабря (11.12–18.12 – 0,86 мг N/л).

Среднее содержание хлоридов в атмосферных осадках на опытной площадке составило 1,9 мг/л (0,20–4,42 мг/л), ионов натрия – 0,87 мг/л (0,05–2,96 мг/л).

Соотношение ионов в атмосферных осадках на экспериментальной площадке в течение года следующее: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- / \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$.

Среди анионов преобладают гидрокарбонаты и хлориды (16,5 и 17,0 % соответственно), среди катионов – натрий и кальций (12,4 и 11,7 % соответственно). Доля кислотообразующих ионов (SO_4^{2-} и NO_3^-) составила 15,4 %.

По сравнению с предыдущим годом в 2023 г. среднее содержание макрокомпонентов в атмосферных осадках сократилось практически по всем показателям, кроме магния, окисленного и восстановленного азота. Среднее содержание серы и хлоридов осталось практически на том же уровне, что и в 2022 г. В последние годы (2021–2023 г.) наблюдается сокращение среднего содержания хлоридов, гидрокарбонатов, натрия, калия и электропроводности.

Сравнение с данными наблюдений на сети станций ЕМЕП. Выполнено сопоставление данных наблюдения химического состава осадков в г. Минске с данными по содержанию загрязняющих веществ в осадках на станциях Программы ЕМЕП (табл. 2). Используются данные электронной базы данных EBAS [14, 15]. В 2023 г. данные о составе атмосферных осадков предоставили 83 станции, из них – в странах – соседях Беларуси – 12 (в Эстонии – 2, в Литве – 1, в Латвии – 1, в Польше – 4, в России – 4) [16, 17].

Сопоставление с данными сети ЕМЕП показало, что Минск находится в среднем европейском диапазоне загрязнения, ближе всего по характеристикам к станциям стран-соседей. Наиболее схожие данные получены для хлоридов, нитратов, кальция и натрия, наибольшие расхождения – для магния и калия. Однако повышенные значения аммонийного азота указывают на возможное усиленное влияние сельскохозяйственных источников в регионе.

Среднегодовое взвешенное содержание серы в атмосферных осадках в 2023 г. составило 0,39 мг S/л, окисленного азота – от 0,26 мг N/л, восстановленного азота – 0,36 мг N/л. Отмечено незначительное увеличение (серы – на 0,02 мг S/л, окисленного азота – на 0,03 мг N/л, восстановленного азота – 0,01 мг N/л) средневзвешенных концентраций данных трёх компонентов в 2023 г. по сравнению с 2022 г. Это указывает на наличие межгодовой вариабельности, обусловленной: изменениями атмосферной циркуляции, интенсивностью трансграничного переноса, локальными источниками выбросов (транспорт, энергетика, сельское хозяйство). В целом за период исследований на экспериментальной площадке с 2002 по 2023 г. сохраняется выявленный ранее в работах [7, 9] нисходящий тренд содержания серы и азота, сочетающийся с восходящим трендом величины рН осадков. За период с 2002 по 2023 г. содержание окисленной серы в атмосферных осадках сократилось на 43,1 %, окисленного

азота – на 28,7, восстановленного азота – на 28,3 %. Среднегодовые темпы сокращения составили 0,018 мг серы, 0,007 мг окисленного и 0,019 мг восстановленного азота.

Обнаружена сходная внутригодовая динамика средневзвешенных концентраций и выпадений соединений серы, нитратного и аммонийного азота на экспериментальной площадке в г. Минске и на ближайших станциях Программы ЕМЕП – Прейла и Дьябла Гора (рис. 1, а). Для всех пунктов наблюдений характерны повышенные концентрации в весенний и позднеосенний периоды и минимальные значения летом, что отражает сезонность поступления загрязняющих веществ и влияние метеорологических условий.

В г. Минске максимальные средневзвешенные концентрации серы и нитратного азота наблюдались в марте – мае и ноябре – декабре, аммонийного азота – в марте – апреле и ноябре – декабре; минимальные значения серы и нитратного азота приходились на июль, аммонийного азота – на август. Сходные сезонные закономерности отмечены и на станциях Прейла и Дьябла Гора.

Динамика выпадений в целом повторяет ряды концентраций, но отдельные пики не совпадают вследствие влияния количества осадков (например, в мае, июле и декабре) (рис. 1, б). Выявленная синхронность указывает на общность процессов переноса и вымывания соединений серы и азота, а повышенные значения в холодный период – на усиление роли отопительного сезона и антропогенных выбросов.

Общая форма сезонных колебаний для всех трёх пунктов наблюдений сходна, что указывает на общность региональных факторов формирования химического состава осадков, включая трансграничный перенос и схожие механизмы атмосферного вымывания загрязняющих веществ. Для г. Минска характерны значения концентраций серы, сопоставимые с Прейлой и превышающие уровни на Дьяблой Горе (0,39 против 0,37 и 0,22 мг S/л соответственно), тогда как по аммонийному азоту г. Минск занимает промежуточное положение между литовской и польской станциями (0,36 против 0,22 и 0,55 мг N/л) (табл. 3). Это свидетельствует о смешанном влиянии регионального переноса и локальных источников, включая транспорт и городские выбросы.

Таблица 2. Среднее содержание основных компонентов гидрохимического состава атмосферных осадков на экспериментальной площадке в г. Минске и на станциях Программы ЕМЕП, 2023 г., мг/л [16]

Table 2. Average content of the main components of the hydrochemical composition of atmospheric precipitation at the experimental site in Minsk and at the EMEP program stations, 2023, mg/l [16]

Показатель	Среднее / диапазон значений		
	Город Минск, экспериментальная площадка	Все станции Программы ЕМЕП	Станции в странах-соседях
Cl ⁻	1,93 / (0,20–4,42)	3,16 / (0,08–94,02)	1,23 / (0,26–4,06)
SO ₄ ²⁻ (S)	0,42 / (н. о.*–0,85)	0,33 / (0,08–4,22)	0,35 / (0,15–0,96)
NO ₃ ⁻ (N)	0,31 / (0,03–0,70)	0,22 / (0,04–2,10)	0,30 / (0,07–1,29)
NH ₄ ⁺ (N)	0,45 / (0,09–1,01)	0,30 / (0,02–1,43)	0,29 / (0,08–0,55)
Ca ²⁺	0,74 / (0,08–1,94)	0,54 / (0,03–5,53)	0,52 / (0,15–1,13)
Mg ²⁺	0,44 / (0,12–2,50)	0,25 / (0,01–6,61)	0,12 / (0,04–0,24)
Na ⁺	0,87 / (0,05–2,96)	1,96 / (0,06–65,41)	0,78 / (0,19–2,12)
K ⁺	0,83 / (0,10–3,85)	0,17 / (0,02–2,08)	0,20 / (0,06–0,44)
Электропроводность	23,10 / (9,90–77,30)	19,50 / (0,01–307,41)	13,45 / (4,63–31,20)
pH	6,12 / (5,08–6,89)	5,52 / (4,13–6,65)	5,16 / (4,53–5,75)

* н. о. – ниже предела обнаружения метода.

Однако при сходстве сезонных трендов абсолютные уровни выпадений в г. Минске выше, чем на обеих фоновых станциях, особенно для соединений серы и аммонийного азота. Годовые выпадения серы составили 241,2 кг/км² в г. Минске против 233,2 кг/км² в Прейле и 114,7 кг/км² на Дьяблой Горе; для NH₄⁺ (N) – 244,1 кг/км² против 135,5 и 289,4 кг/км² соответственно (табл. 3). Повышенные выпадения в г. Минске обусловлены как более высоким количеством осадков, так и возможным дополнительным вкладом локальных антропогенных источников. В то же время близость сезонной структуры выпадений подтверждает региональный масштаб процессов формирования атмосферных выпадений.

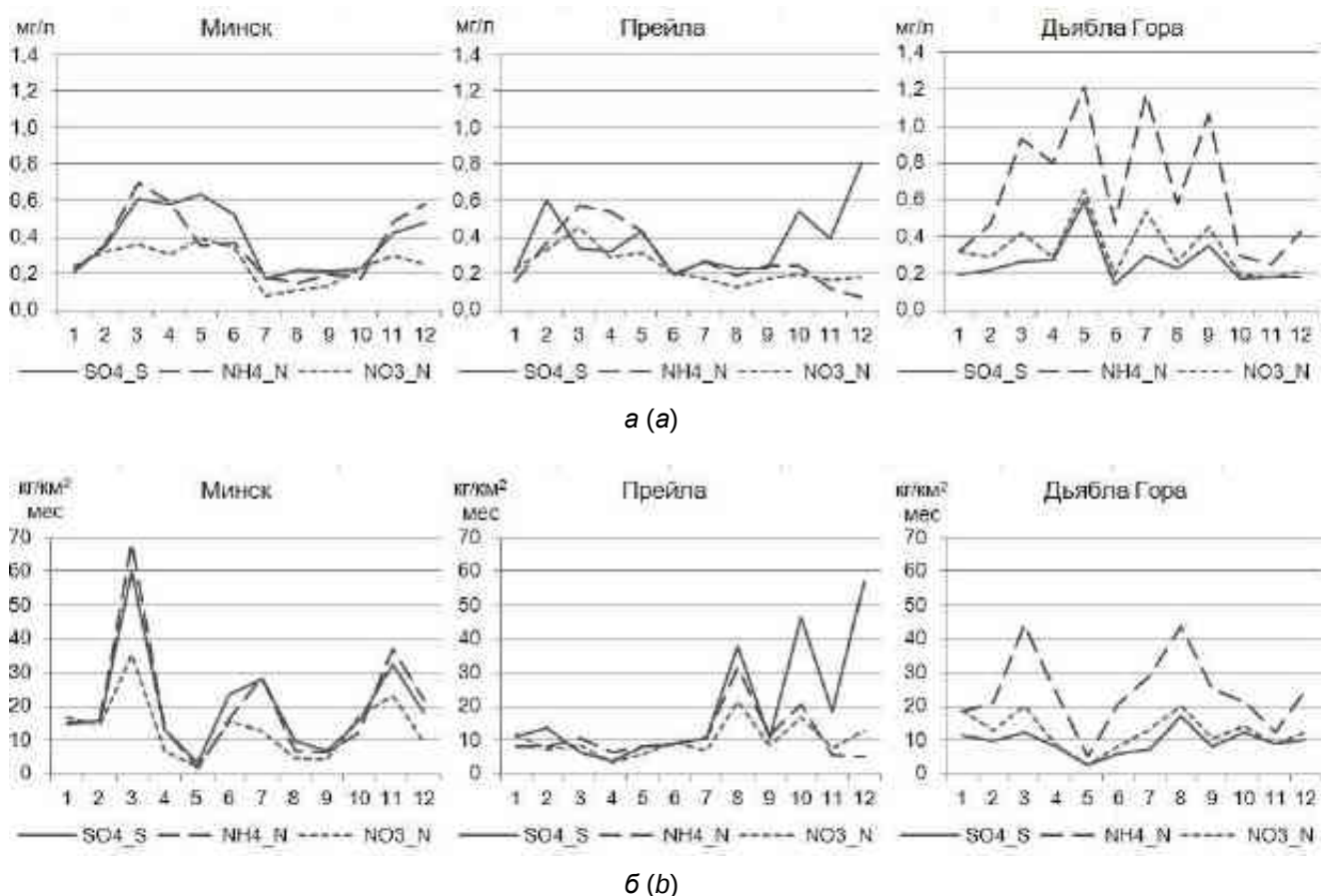


Рис. 1. Сезонная динамика средневзвешенных концентраций (а) и выпадений (б) соединений серы и азота в атмосферных осадках в г. Минске и на станциях фоновое мониторинга программы ЕМЕП – Прейла и Дьябла Гора, 2023 г.

Fig. 1. Seasonal dynamics of weighted average concentrations (a) and deposition (b) of sulfur and nitrogen compounds in atmospheric precipitation in Minsk and at the EMEP background monitoring stations – Preila and Djabla Gora, 2023

Таблица 3. Среднегодовое взвешенное содержание серы и азота в атмосферных осадках и годовые выпадения серы и азота на экспериментальной площадке в г. Минске и фоновых станциях мониторинга программы ЕМЕП –Прейла и Дьябла Гора

Table 3. Average annual weighted content of sulfur and nitrogen in atmospheric precipitation and annual deposition of sulfur and nitrogen at the experimental site in Minsk and background monitoring stations of the EMEP program – Preila and Djabla Gora

Место отбора	Количество садков, мм	Среднегодовое взвешенное содержание			Годовые выпадения, кг/км ²		
		NH ₄ ⁺ (N), мг N/л	NO ₃ ⁻ (N), мг N/л	SO ₄ ²⁻ (S), мг S/л	NH ₄ ⁺ (N)	NO ₃ ⁻ (N)	SO ₄ ²⁻ (S)
Прейла	628,14	0,22	0,19	0,37	135,5	120,1	233,2
Дьябла Гора	530,90	0,55	0,28	0,22	289,4	150,9	114,7
Минск	707,55	0,36	0,26	0,39	244,1	162,0	241,2

Во всех пунктах наблюдений выявлена синхронная внутригодовая динамика соединений серы и азота, указывающая на общность источников поступления и региональный характер атмосферного переноса загрязняющих веществ.

Сезонные максимумы концентраций и выпадений преимущественно приходятся на холодный период года, что вероятно связано с усилением выбросов в отопительный сезон и особенностями метеословий.

Минск по уровню содержания серы и азота находится в диапазоне значений станций Программы ЕМЕР и близок к станциям стран-соседей, что подтверждает сопоставимость регионального фона загрязнения. Более высокие выпадения в г. Минске по сравнению с фоновыми станциями указывают на дополнительное влияние локальных городских источников загрязнения при сохранении ведущей роли регионального переноса. Сходство динамики концентраций и выпадений на всех трёх площадках подтверждает, что химический состав атмосферных осадков в г. Минске формируется под совместным воздействием трансграничных и локальных факторов.

Сравнение полученных результатов с результатами мониторинга серы и азота в атмосферных осадках на Европейской части Российской Федерации (ЕТР). Выполнено сопоставление данных наблюдения средневзвешенных концентраций серы и азота в г. Минске с данными об их содержании в осадках двух ближайших к территории Беларуси физико-географических регионов России [18, 19].

В 2023 г. в федеральных округах Российской Федерации среднегодовые взвешенные концентрации серы в атмосферных осадках варьировали в диапазоне 1,2–4,3 мг/л, нитратного азота – 1,0–3,2, аммонийного азота – 0,3–1,0 мг/л [18, 19]. В ближайших к территории Беларуси Северо-западном федеральном округе (СЗФО) и Центральном федеральном округе (ЦФО) среднегодовые взвешенные концентрации серы составили 1,4 и 3,9 мг/л, нитратного азота – 1,0 и 1,8, аммонийного азота – 0,3 и 0,7 мг/л соответственно. Средневзвешенные концентрации серы и азота в СЗФО наиболее близки к полученным нами значениям в г. Минске.

Сравнение с данными НСМОС. В Республике Беларусь по данным на 2023 г. наблюдения за химическим составом атмосферных осадков проводились на 22 пунктах наблюдений НСМОС [12, 13]. В г. Минске в 2023 г. общая минерализация проб атмосферных осадков составила 12 мг/л, из которых на долю сульфатов приходилось 8 %. В соответствии с имеющимися данными, в период с 2020 по 2023 г. наблюдалась сходимость рядов среднегодового содержания серы в атмосферных осадках на станции НСМОС в г. Минске и в рамках нашего исследования. Кроме того, отмечается схожая тенденция к сокращению среднегодовых концентраций серы в указанный период.

Химический состав снежного покрова на экспериментальной площадке в 2023 г. Зимний период 2022–2023 гг. отличается неустойчивым снежным покровом с несколькими периодами его устойчивого залегания. Осадки в виде снега, мокрого снега с дождём выпадали несколько раз в ноябре – декабре; начиная с 17 ноября 2022 г. образовался снежный покров, который полностью растаял к 23 декабря 2022 г. Снег в первый период на опытной площадке залегал в течение 37–38 дней. Затем 25 декабря опять выпал снег, который пролежал до марта. Дата полного схода снежного покрова на экспериментальной площадке – 15 марта 2023 г.

За зимний период 2022–2023 гг. на экспериментальной площадке отобрано и проанализировано 9 проб снега на всю толщину снежного покрова. 2 пробы отобраны в декабре 2022 г. в первый период залегания снега и 7 проб – в конце декабря 2022 г. – марте 2023 г. после повторного образования устойчивого снежного покрова. Средняя высота снежного покрова на экспериментальной площадке составила 20,5 см, влагозапас – 40,8 кг/м².

Минерализация снеговой воды в 2022–2023 гг. варьировала в диапазоне 5,5–14,8 мг/л и в среднем составила 9,5 мг/дм³, что немного ниже по сравнению со средним значением предыдущего зимнего периода 2021–2022 гг. (10,2 мг/л) и ниже средних значений зимних периодов с 2016–2017 по 2020–2021 гг. (11,0–24,6 мг/л). Коэффициент вариации значений невысокий и составил 33 %.

По результатам опробования среднее значение pH в период залегания снежного покрова в 2022–2023 гг. достигло 5,97 при минимальном значении – 5,71 и максимальном – 6,21 (табл. 4). По данным НСМОС, в городах Беларуси значения pH колебались в пределах от 5,2 до 6,1. Минимальное значение (5,10) отмечено в снежном покрове в г. п. Езерище, максимальное (6,59) – в г. Костюковичи [13].

Согласно данным [19], на более чем 60 % территории Российской Федерации среднемесячный показатель pH по регионам в зимний период 2022–2023 гг. находился в пределах 5,5–6,5; в ближайших к Беларуси регионах он составил 6,0–7,0.

Содержание окисленной серы в пробах снежного покрова фиксировалось от 0,22 до 0,42 мг S/л со средним значением 0,31 мг S/л. Среднее значение окисленного азота в пробах снежного покрова, отобранных по г. Минску, составило 0,35 мг N/л и варьировало от 0,22 до 0,46 мг N/л. Содержание восстановленного азота в пробах снежного покрова фиксировалось на уровне от 0,15 до 0,29 мг N/дм³ (в среднем 0,22 мг N/л).

Таблица 4. Гидрохимический состав снеговых вод на постоянной экспериментальной площадке на территории г. Минска в зимний период 2022–2023 гг.**Table 4.** Hydrochemical composition of snow waters at a permanent experimental site in the city of Minsk in the winter period of 2022–2023

Параметр	HCO_3^-	Cl^-	$\text{SO}_4^{2-}(\text{S})$	$\text{NO}_3^-(\text{N})$	$\text{NH}_4^+(\text{N})$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	pH	Электропроводность, мкСм/см
Среднее, мг/л	2,5	2,7	0,31	0,35	0,22	0,75	0,30	1,59	0,74	5,97	23,05
Коэффициент вариации, %	70,3	24,0	25,0	22,9	18,8	48,6	34,4	36,0	58,0	2,7	21,5

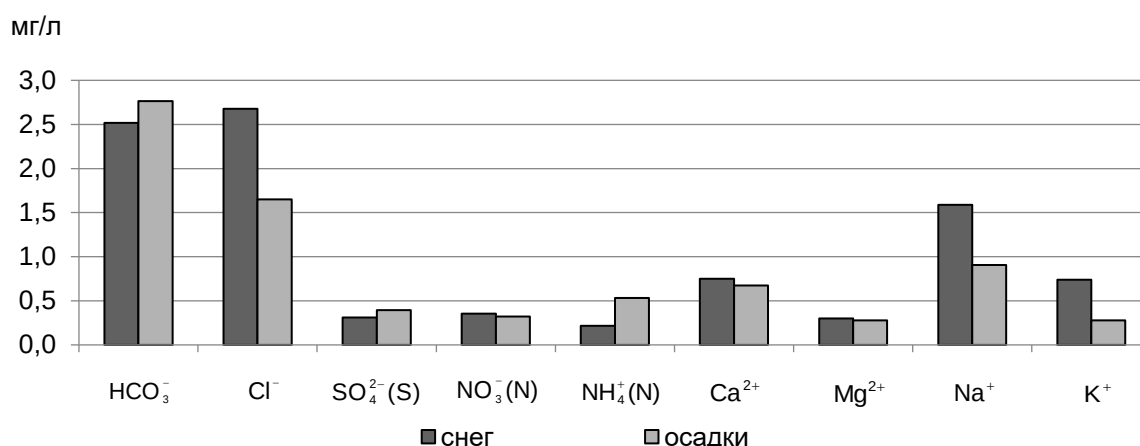
Среднее содержание хлоридов в снеге на опытной площадке составило 2,7 мг/л (1,94–3,61 мг/л). Полученные значения близки к данным НСМОС, которые в городах Беларуси фиксировались на уровне от менее чем 1,0 мг/л до 3,3 мг/л (г. Полоцк) [13].

Содержание ионов натрия в пробах снежного покрова на экспериментальной площадке во дворе Института природопользования НАН Беларуси составило 0,85–2,55 мг/л со средним значением 1,59 мг/л. По данным НСМОС в городах Витебске, Гомеле, Горках, Костюковичах, Минске, Мозыре, Полоцке, Славгороде и г. п. Езерище концентрации натрия варьировались в диапазоне 1,19–1,67 мг/л [13].

По всем показателям химического состава снежного покрова на постоянной экспериментальной площадке на территории Института природопользования НАН Беларуси в зимний период 2022–2023 гг. разброс значений был ниже среднего (см. табл. 4); исключение – гидрокарбонаты и калий (коэффициенты вариации составили 70,3 и 58,0 % соответственно).

По сравнению с 2021–2022 гг., в 2022–2023 гг. наблюдалось увеличение среднего содержания по следующим компонентам гидрохимического состава снежного покрова: среднее содержание хлоридов на 0,68 мг/л, нитратов – на 0,02 мг N/л, кальция – 0,12 мг/л, магния – на 0,03, натрия – 0,31, калия – на 0,26 мг/л. В то же время среднее содержание гидрокарбонатов в снеге сократилось на 0,1 мг/л, сульфатов – на 0,08 мг S/л, аммонийного азота – 0,14 мг N/л, в том числе и по сумме ионов – на 0,79 мг/л; среднее значение показателя pH уменьшилось на 0,51.

Средние концентрации основных ионов в атмосферных осадках (за период залегания снега) и в снежном покрове имеют схожие значения по ряду показателей. Наибольшие отличия наблюдаются в средних концентрациях восстановленного азота (в осадках в 2,4 раза выше, чем в снеге), хлоридов, калия и натрия – средние значения этих показателей в снежном покрове в 1,6–2,7 раза выше, чем в пробах атмосферных осадков за период залегания снежного покрова (рис. 2).

**Рис. 2.** Сравнительное содержание основных ионов в атмосферных осадках (средние за период залегания снега) и снежном покрове на экспериментальной площадке, 2022–2023 гг.**Fig. 2.** Comparative content of the main ions in atmospheric precipitation (average for the period of snow cover) and snow cover at the experimental site, 2022–2023

Заключение. Выполненное исследование позволило охарактеризовать особенности химического состава атмосферных осадков и снежного покрова на основе анализа результатов мониторинга химического состава атмосферных осадков на экспериментальной площадке Института природопользования НАН Беларуси в 2023 г. и сравнить их с осуществлёнными ранее исследованиями.

Проведённое исследование позволило выявить ряд дополнительных закономерностей. Установлено снижение общей минерализации атмосферных осадков при сохранении годового количества осадков, что может свидетельствовать о снижении аэрозольной нагрузки, однако влияние метеорологических факторов также существенно. Долгосрочные тренды показывают уменьшение содержания соединений серы и азота, однако в 2023 г. отмечены межгодовые колебания. Реакция среды осадков остаётся преимущественно нейтральной, что обусловлено влиянием нейтрализующих компонентов. Синхронность динамики серы и азота подтверждает их общее происхождение.

В снежном покрове выявлено значительное влияние антропогенных факторов, особенно в городской среде, где зафиксировано повышенное содержание хлоридов и натрия.

Сопоставление данных наблюдений химического состава осадков в г. Минске с содержанием на станциях Программы ЕМЕП показало, что в целом диапазон средних годовых концентраций серы и азота в атмосферных осадках в г. Минске укладывается в диапазон изменений концентраций этих компонентов на станциях ЕМЕП. Наиболее заметное отклонение среднегодового содержания в атмосферных осадках в г. Минске от диапазона колебаний концентраций в рассматриваемый период на указанных станциях ЕМЕП характерно для магния и калия.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания подпрограммы 1 «Природные ресурсы и их рациональное использование» государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг. (№ госрегистрации 20210126).

Acknowledgements. The study has been performed within the Task of the Subprogram 1 “Natural resources and their rational use” of the State Program of Scientific Investigations “Natural Resources and Environment” for 2021–2025 (State registration No. 20210126).

Список использованных источников

1. Chemical composition characteristics and source contributions of precipitation in typical cities on the north slope of Tianshan mountain in Xinjiang during 2010–2019 / Yuting Zhong, Xia Li, Ziang Fan [et al.] // *Atmosphere*. – 2022. – Vol. 13, № 5. – Art. 646. – DOI: 10.3390/atmos13050646.
2. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus/ R. Vet, R. S. Artz, S. Carou [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2014. – Vol. 93. – P. 3–100. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.10.060.
3. Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000–2017 / Á. Keresztesi, M.-V. Birsan, I.-A. Nita [et al.] // *Environmental Sciences Europe*. – 2019. – Vol. 31, № 1. – Art. 50. – DOI: 10.1186/s12302-019-0234-9.
4. Еремина, И. Д. Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений / И. Д. Еремина // *Вестник Московского университета. Серия 5, География*. – 2019. – № 3. – С. 3–10.
5. Mouli P.C Rainwater chemistry at a regional representative urban site: influence of terrestrial sources on ionic composition / P. C. Mouli, S. V. Mohan, S. J. Reddy // *Atmospheric Environment*. – 2005. – Vol. 39. – P. 999–1008. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.10.036.
6. Fagerli, H. Trends of nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe, 1980–2003 / H. Fagerli, W. Aas // *Environmental Pollution*. – 2008. – Vol. 154 (3). – P. 448–461. – DOI: 10.1016/j.envpol.2008.01.024.
7. Какарека, С. В. Особенности химического состава атмосферных осадков в г. Минске в 2018–2022 гг. / С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич // *Природопользование*. – 2024. – № 1. – С. 41–53. – DOI: 10.47612/2079-3928-2024-1-41-53.
8. Какарека С. В. Многолетняя динамика содержания серы и азота в снежном покрове в Минске / С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич // *Метеорология и гидрология*. – 2024. – № 10. – С. 88–101.
9. Какарека, С. В. Тренды содержания закисляющих и эвтрофирующих соединений в атмосферных осадках на урбанизированной территории / С. В. Какарека, Ю. Г. Кокош, М. А. Кудревич // *Доклады НАН Беларуси*. – 2021. – Т. 65, № 6. – С. 724–733. – DOI: 10.29235/1561-8323-2021-65-6-724-733.
10. Manual for the GAW precipitation chemistry programme // QA/SAC – Americas. – URL: https://s3.us-east-2.amazonaws.com/envirovantage/GAW-PrecipChemManualNo160_Ammended15Oct2015.pdf (date of access: 24.06.2021).
11. EMEP Manual for sampling and chemical analysis. EMEP/CCC Report 1/95, Revision 2001. – Kjeller ; Lillestrøm : Norwegian Institute for Air Research, 2001. – 303 p.

12. Ежегодник состояния атмосферного воздуха. 2023 год. Химический состав атмосферных осадков // Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды. – Мн., 2024. – URL: <https://rad.org.by/articles/vozduh/ezhegodnik-sostoyaniya-atmosfernogo-vozduha-2023/himicheskiy-sostav-atmosfernyh-osadkov.html> (дата обращения: 12.03.2025).
13. Национальная система мониторинга окружающей среды. Результаты наблюдений НСМОС за 2023 г. Мониторинг атмосферного воздуха : [сайт]. – Мн., 2024. – URL: <https://www.nsmos.by/sites/default/files/2024-06/4-monitoring-atmosfernogo-vozdukha.pdf> (дата обращения: 24.01.2024).
14. EMEP/CCC Reports 2020–2023 : [site]. – [Kjeller], 2024. – URL: <https://projects.nilu.no/ccc/reports.html> (date of access: 04.02.2024).
15. EBAS Home, 2024 : [site]. – [Kjeller], 2024. – URL: <https://ebas.nilu.no/> (date of access: 12.03.2024)
16. Hjellbrekke, A.-G. Data Report 2023. Particulate matter, carbonaceous and inorganic compounds / A.-G. Hjellbrekke. – Kjeller : NILU, 2025. – 172 p. – (EMEP/CCC-Report 1/2025).
17. EMEP MSC-W modelled air concentrations and depositions, 2024 : [site]. – [Oslo], 2024. – URL: https://emep.int/mscw/mscw_moddata.html (date of access: 18.03.2024).
18. Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2023 г. / под ред. Г. М. Черногаевой. – М. : Росгидромет, 2024. – 135 с.
19. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2023 год / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ; под ред. Г. М. Черногаевой. – М. : Росгидромет, 2024. – URL: <http://downloads.igce.ru/publications/reviews/review2024.pdf> (дата обращения: 21.05.2026).

References

1. Zhong Yuting, Li Xia, Fan Ziang, Ayitken Maulen, Li Shuting, Liu Xinchun. Chemical composition characteristics and source contributions of precipitation in typical cities on the north slope of Tianshan mountain in Xinjiang during 2010–2019. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, no. 5, art. 646, DOI: 10.3390/atmos13050646.
2. Vet R., Artz R. S., Carou S., e. a. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus, *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 93, pp. 3–100, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.10.060.
3. Keresztesi Á., Birsan M.-V., Nita I.-A., Bodor Z., Robert S. Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000–2017. *Environmental Sciences Europe*, 2019, vol. 31, no. 1, art. 50, DOI: 10.1186/s12302-019-0234-9.
4. Eremina I. D. *Khimicheskii sostav atmosferykh osadkov v Moskve i tendentsii ego mnogoletnikh izmenenii* [Chemical composition of atmospheric precipitation in Moscow and the trends of its long-term changes]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya = Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, 2019, no. 3, pp. 3–10. (in Russian)
5. Mouli P. C., Mohan S. V., Reddy S. J. Rainwater chemistry at a regional representative urban site: influence of terrestrial sources on ionic composition. *Atmospheric Environment*, 2005, vol. 39, pp. 999–1008. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.10.036.
6. Fagerli H., Aas W. Trends of nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe 1980–2003. *Environmental Pollution*, 2008, vol. 154, pp. 448–461. DOI: 10.1016/j.envpol.2008.01.024.
7. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. *Osobennosti khimicheskogo sostava atmosferykh osadkov v g. Minske v 2018–2022 gg.* [Features of the chemical composition of atmospheric precipitation in Minsk in 2018–2022]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 41–53, DOI: 10.47612/2079-3928-2024-1-41-53. (in Russian)
8. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. *Mnogoletnyaya dinamika sodержaniya sery i azota v snezhnom pokrove v Minske* [Long-term dynamics of sulfur and nitrogen content in snow cover in Minsk]. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*, 2024, no. 10, pp. 88–101. (in Russian)
9. Kakareka S. V., Kokosh Yu. G., Kudrevich M. A. *Trendy sodержaniya zakislyayushchikh i evtrofiruyushchikh soedineniy v atmosferykh osadkakh na urbanizirovannoy territorii* [Trends in the content of acidifying and eutrophying compounds in atmospheric precipitation in an urbanized area]. *Doklady NAN Belarusi = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 6, pp. 724–733, DOI: 10.29235/1561-8323-2021-65-6-724-733. (in Russian)
10. Manual for the GAW precipitation chemistry programme. QA/SAC – Americas. URL: https://s3.us-east-2.amazonaws.com/envirovantage/GAW-PrecipChemManualNo160_Ammended15Oct2015.pdf. (accessed June 24, 2021).
11. EMEP Manual for sampling and chemical analysis. *EMEP/CCC Report 1/95, Revision 2001*. Kjeller, Lillestrøm, Norwegian Institute for Air Research Publ., 2001, 303 p.
12. *Yezhegodnik sostoyaniya atmosfernogo vozdukha. 2023 god. Khimicheskii sostav atmosferykh osadkov* [Yearbook of the state of atmospheric air. 2023. Chemical composition of atmospheric precipitation]. Minsk, Republican Center for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring Publ., 2024.

- URL: <https://rad.org.by/articles/vozduh/ezhegodnik-sostoyaniya-atmosfernogo-vozduha-2023/himicheskiy-sostav-atmosfernyh-osadkov.html> (accessed March 12, 2025). (in Russian)
13. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy. Rezul'taty nablyudeniy NSMOS za 2023 g. Monitoring atmosfernogo vozdukh* [National environmental monitoring system. Results of NSMOS observations for 2023. Ambient air monitoring]: [site]. Minsk, 2024. URL: <https://www.nsmos.by/sites/default/files/2024-06/4-monitoring-atmosfernogo-vozdukh.pdf> (accessed January 24, 2024). (in Russian)
 14. EMEP/CCC Reports 2020–2023: [site]. Kjeller, 2024. URL: <https://projects.nilu.no/ccc/reports.html>. (accessed February 4, 2024).
 15. EBAS Home, 2024: [site]. Kjeller, 2024. URL: <https://ebas.nilu.no/> (accessed March 12, 2024).
 16. Hjellbrekke, A.-G. Data Report 2023. Particulate matter, carbonaceous and inorganic compounds (EMEP/CCC-Report 1/2025). Kjeller, NILU Publ., 172 p.
 17. EMEP MSC-W modelled air concentrations and depositions, 2024: [site]. Oslo, 2024. URL: https://emep.int/mscw/mscw_moddata.html (accessed March 18, 2024).
 18. *Obzor fonovogo sostoyaniya okruzhayushchey prirodnoy sredy na territorii stran SNG za 2023 g.* [Review of the background state of the natural environment in the CIS countries for 2023]. Ed. by G. M. Chernogaeva. Moscow, Rosgidromet Publ., 2024, 135 p. (in Russian)
 19. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federatsii za 2023 god* [Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2023]. Ed. by G. M. Chernogaeva. Moscow, Rosgidromet Publ., 2025. Available at: <http://downloads.igce.ru/publications/reviews/review2024.pdf> (accessed May 21, 2026). (in Russian)

Информация об авторах

Кокош Юлия Геннадьевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории трансграничного загрязнения, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: y-kokosh@mail.ru

Кудревич Мария Александровна – научный сотрудник лаборатории трансграничного загрязнения, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kudrevich.mary.1991@gmail.com

Information about the authors

Yuliya G. Kokosh – Senior Researcher of Laboratory of Transboundary Pollution, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: y-kokosh@mail.ru

Mariya A. Kudrevich – Researcher of Laboratory of Transboundary Pollution, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kudrevich.mary.1991@gmail.com

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ И ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПОВТОРНО ОБВОДНЕННЫХ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ БОРИСОВО-ГЛУССКОГО ТОРФЯНОГО РАЙОНА (РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ)

О. Н. Ратникова, В. И. Пашкевич, А. Т. Борш, Т. И. Макаренко

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье представлены результаты исследований повторно обводненных верховых болот Борисово-Глусского торфяного района торфяно-болотной области крупных верховых и низинных болот полого-волнистой абляционной равнины Беларуси. Они включали изучение гидрологического режима болот (высоких, средних, низких годовых значений уровней грунтовых вод и амплитуды колебаний), гидрохимического режима (общей минерализации грунтовых болотных вод, содержания анионов и катионов, величины окислительно-восстановительного потенциала, кислотности), общетехнических характеристик торфа (ботанического состава и степени разложения торфа, влажности, зольности, эмиссии и поглощения диоксида углерода). Установлено, что болота верхового типа после проведения мероприятий экологической реабилитации проходят две стадии восстановления гидрологического и гидрогеохимического режима. Прослежен положительный эффект от повторного обводнения, выполненного на площади 2,6 тыс. га: уменьшение глубины залегания уровней грунтовых болотных вод в 2,4 раза, уменьшение амплитуды колебаний и сокращение деятельного горизонта в 2 раза и, как следствие, насыщение верхних слоев торфяной залежи водой, что обусловило восстановление видового разнообразия болотных фитоценозов. В настоящее время здесь преобладают сосново-кустарничково-сфагновые фитоценозы с общей минерализацией грунтовых вод до 28–57 мг/л и общим гидрологическим фоном, близким к естественному фону верховых болот Беларуси. Эмиссия углерода сменилась его поглощением и накоплением в торфяной залежи. Благодаря проведенным мероприятиям сформировавшийся гидрологический режим торфяников будет способствовать смягчению климата района и на прилегающих лесо- и сельскохозяйственных территориях, а также обеспечит устойчивую среду обитания для биологического разнообразия.

Ключевые слова: болото; торфяник; торфяно-болотный район; гидрологический режим; гидрогеохимический режим; повторное обводнение; лесохозяйственное использование.

Для цитирования. Ратникова О. Н., Пашкевич В. И., Борш А. Т., Макаренко Т. И. Гидрологический и гидрогеохимический режим повторно обводненных верховых болот Борисово-Глусского торфяного района (Республика Беларусь) // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 172–182.

HYDROLOGICAL AND HYDROGEOCHEMICAL REGIME OF RE-FLOODED UPPER BOGS OF THE BORISOVO-GLUSS PEAT REGION (REPUBLIC OF BELARUS)

O. N. Ratnikova, V. I. Pashkevich, A. T. Borsh, T. I. Makarenko

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The article presents the results of research on re-watered raised bogs in the Borisovo-Gluss peat district of the peat-and-bog region of large raised and low-lying bogs in the gently undulating ablation plain of Belarus. They included the study of their hydrological regime (high, medium, and low annual values of groundwater levels and the amplitude of fluctuations), hydrochemical regime (total mineralization of groundwater, content of anions and cations, redox potential, and acidity), general technical characteristics of peat (botanical composition and degree of peat decomposition, moisture content, ash content, and carbon dioxide emission and absorption). It was found that after environmental rehabilitation measures, raised-type bogs undergo two stages of restoration of their hydrological and hydrogeochemical regimes. The positive effects of reirrigation, carried out over an area of 2,600 hectares, were observed: a 2.4-fold reduction in groundwater table depth, a reduction in fluctuation amplitude, and a halving of the active horizon. Consequently, the upper layers of the peat deposit were saturated with water, leading to the restoration of the species diversity of the bog phytocoenoses. Currently, pine-dwarf shrub-sphagnum phytocoenoses predominate here, with a total groundwater mineralization of up to 28–57 mg/L and a general hydrological background similar to that of the natural raised bogs of Belarus. Carbon emissions have been replaced by absorption and accumulation in the peat deposit. Thanks to the measures taken, the established hydrological regime of the peatlands will help mitigate the local climate within both the adjacent forest and agricultural areas, as well as ensure a sustainable habitat for biological diversity.

Keywords: bog peatlands; peat-swamp area; hydrological regime; hydrogeochemical regime; rewatering; forestry use.

For citation. Ratnikova O. N., Pashkevich V. I., Borsh A. T., Makarenko T. I. Hydrological and hydrogeochemical regime of re-flooded raised bogs of the Borisov-Glussky peat region (Republic of Belarus). *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 172–182.

Введение. Болото в естественном состоянии – это единственная из существующих геоэкосистем, где происходит постоянное накопление органического вещества в виде торфа, что обеспечивает долговременный вывод из атмосферы избыточного количества диоксида углерода. Вместе с формированием и аккумуляцией торфа происходит процесс накопления биогенных химических элементов – кислорода, водорода, углерода, фосфора, калия, магния и других микроэлементов, входящих в состав растений-торфообразователей. За счет сохранения тепла болота регулируют микроклимат, увлажняют воздух, делая его более мягким, регулируют сток рек, удерживая и отдавая воду в засушливый период. Однако эти процессы происходят лишь в торфяниках, находящихся в естественном состоянии. Необходимым условием для торфонакопления является преобладание ежегодного прироста новой органической массы над количеством ежегодного разлагающегося материала. Интенсивность протекания этого процесса зависит от положения уровня грунтовых болотных вод (далее – УГВ) в деятельном горизонте, температуры и продолжительности вегетационного периода [1, 2].

Как известно, основным фактором антропогенного воздействия на торфяник является гидротехническая осушительная мелиорация. Сброс воды по осушительным каналам воздействует на естественный УГВ, активируя геохимический вынос минеральных компонентов и других, и, как следствие, обуславливает изменение структуры растительного покрова. Метеорологические условия, торфяные и лесные пожары также приводят к изменению видового состава болотной растительности, однако они имеют непостоянный характер, и с течением времени болотные фитоценозы, испытывавшие их воздействие, восстанавливаются.

Цели работы – оценить динамику гидрологического и гидрогеохимического режима болот, выявить процессы и стадии их восстановления после проведения мероприятий экологической реабилитации.

Объекты исследования – ключевые участки повторно обводненных торфяников Копыш, Рудянец и Червенское верхового типа торфяной залежи, расположенные в Борисово-Глусском торфяном районе торфяно-болотной области крупных верховых и низинных болот пологоволнистой абляционной равнины Беларуси.

Предмет исследования – гидрологический и гидрогеохимический режимы.

Под термином *грунтовые (болотные) воды* понимаются подземные воды первого от поверхности земли безнапорного водоносного горизонта, получающего водное питание на площади его распространения [3]. При этом УГВ – это граница, ниже которой торфяная залежь насыщена водой [4].

Основные исследуемые параметры: гидрологический режим (минимум, максимум и среднегодовые (среднегодовое) значения УГВ, положение кривой хода УГВ относительно поверхности болота в течение гидрологического года (вегетационного периода)); гидрохимический режим (химический состав грунтовых вод) (общая минерализация, содержание анионов и катионов, окислительно-восстановительный потенциал и кислотность воды), а также общетехнические свойства торфа в залежи, величина эмиссии и стока диоксида углерода.

Процесс исследования включал в себя четыре основных этапа.

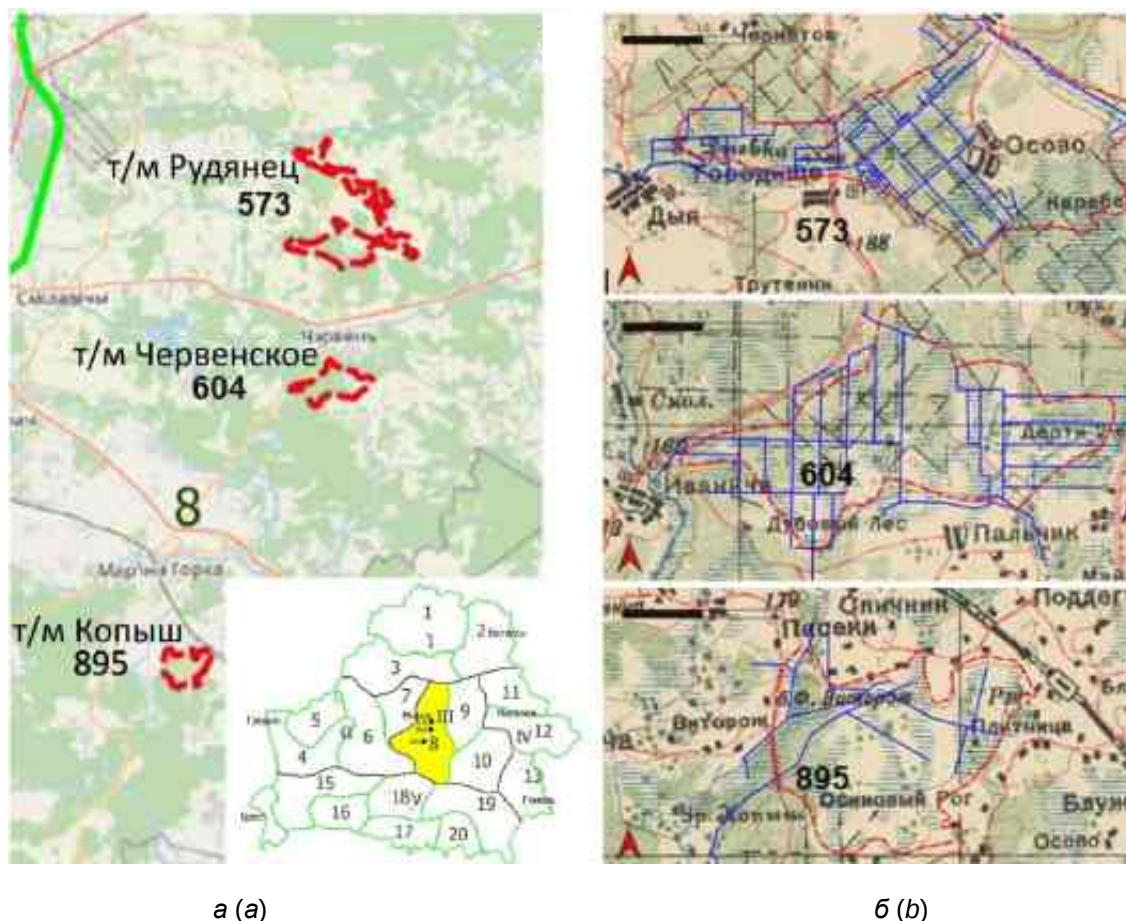
Подготовительный: изучение и анализ имеющейся информации об объектах исследования: геоморфологических, гидрологических характеристик торфяников и торфяного района исследования, а также картографического материала и космоснимков.

Полевой: гидрологические исследования, которые проводили при помощи современного оборудования – автоматических датчиков регистрации, позволявших измерять УГВ дважды в сутки; гидрохимические – в обустроенных смотровых колодцах (скважинах) на пунктах наблюдения (далее – ПН) измерения окислительно-восстановительных потенциалов (Eh) и кислотности (pH) грунтовых (болотных) вод при помощи портативного оборудования, а также отбор проб воды для дальнейших лабораторных исследований химического состава; геологические – включавшие отбор проб торфа торфяным буром, анализ отобранных образцов в полевых условиях на ботанический состав и степень разложения и подготовка образцов для лабораторных испытаний на общетехнический анализ торфа.

Лабораторные исследования, которые включали анализ отобранных образцов (проб) грунтовых болотных вод и торфа стандартизированными методами для каждого параметра в аккредитованной лаборатории биогеохимии и агроэкологии Института природопользования НАН Беларуси.

Информационно-аналитические исследования, которые включали статистическую обработку результатов полевых и лабораторных испытаний; оценку современного состояния гидрологического и гидрогеохимического режима восстанавливаемых болот, прогноз его изменения.

Результаты и их обсуждение. Исследуемые ключевые участки верховых болот Рудянец (кадастровый номер 573), Червенское (604) и Копыш (895) расположены в Борисово-Глуском торфяном районе (№ района 8) торфяно-болотной области крупных верховых и низинных болот пологоволнистой абляционной равнины Беларуси (№ области III) (рис. 1) [5]. Их общая площадь в нулевой границе – 5733 га, площадь восстанавливаемой части верховых болот – 2638 га.



— — граница торфяно-болотной области; — — граница торфяно-болотного района;
 I–V – номер торфяно-болотной области [5]; 1–20 – номер торфяно-болотного района [5];
 573, 604, 895 – кадастровые номера торфяников Рудянец, Червенское, Копыш;
 - - - - нулевая граница торфяника; — — современные осушительные каналы

Рис. 1. Картограммы расположения исследуемых торфяников относительно районирования территории Беларуси (а), исторической карты РККА 1933 г. М 1 : 50 000 (б) и современной гидрологической сети

Fig. 1. Map-schemes of the location of the studied peatlands in relation to the zoning of the territory of Belarus (a), the historical RKKA map of 1933 M 1 : 50 000 (b), and the modern hydrological network

На начальной стадии своего существования эти болота, располагавшиеся на больших плоских междуречных территориях, не имели намывного питания, а получали преимущественно грунтовое водно-минеральное питание. По мере роста болота грунтовое питание сократилось, уступая место атмосферному [5]. На слабоволнистой поверхности территории Борисово-Глуского торфяного района формировались болота (участки болот) Рудянец, Червенское и Копыш верхового типа с грядово-мочажинным комплексом растительности. В прошлом болотный массив (Рудянец) представлял сложную систему из отдельных болот, в последующем разросшихся и объединившихся. К верховому типу болот относится южный участок болотного массива Рудянец, на остальной части преобладают низинные виды торфа.

Гидрогеохимические условия болот определяются условиями их водно-минерального питания, связанными с геологическим строением торфяно-болотного района и климатом. В целом район исследования характеризуется высокой заторфованностью (около 21 %), торфяники занимают большие площади водоразделов и междуречий в бассейне реки Березины.

Питание болот верхового типа осуществляется восполнением за счет атмосферных осадков. Благодаря устойчивости мхов к разрушению, высокой кислотности среды (рН 2,6–3,6), а также изоляции сфагновых фитоценозов от исходных условий (минерального ложа и грунтовых вод) в болотных водах поддерживается крайне бедная концентрация минеральных веществ – в основном менее 50 мг/л. Ионный состав вод верховых болот имеет генетическое сходство с ионным составом атмосферных осадков (среди катионов преобладают Ca^{2+} и NH_4^+ , среди анионов – Cl^- и SO_4^{2-}).

Первичными очагами заболачивания на исследуемых болотах были незначительные понижения рельефа в различных частях территории, на которых торфообразование происходило в условиях богатого водно-минерального питания за счет активной разгрузки грунтовых вод и вод поверхностного стока с прилегающих суходолов. Это способствовало образованию торфа низинного типа – древесно-сфагнового и древесно-тростникового. Его накопленная мощность не превышала 0,5 м, степень разложения достигала 30–50 %. С ростом залежи и изменением источников водно-минерального питания низинный тип торфа сменялся осоковым, осоково-гипновым, сфагновым, т. е. переходными видами торфа. Когда рельеф болота приобрел выпуклую форму (современный этап развития исследуемых болот), здесь начали откладываться сфагновый, пушицево-сфагновый и комплексный виды торфа верхового типа, мощность которого достигает 3,0 м, степень разложения не превышает 10–25 %.

Анализ отобранных образцов торфа на глубину деятельного горизонта (рис. 2–4), показал, что все общетехнические характеристики торфяной залежи характерны для болота в естественном состоянии, однако наблюдается зазольение торфяной залежи верхнего (0,25 м) слоя на исследуемом ключевом участке торфяника Рудянец (зольность 6,2 %), Копыш (5,6 %) и Червенское (5,3 %). Это связано, прежде всего, с неоднократными торфяными пожарами прошлых лет и процессами минерализации торфа в условиях осушения.

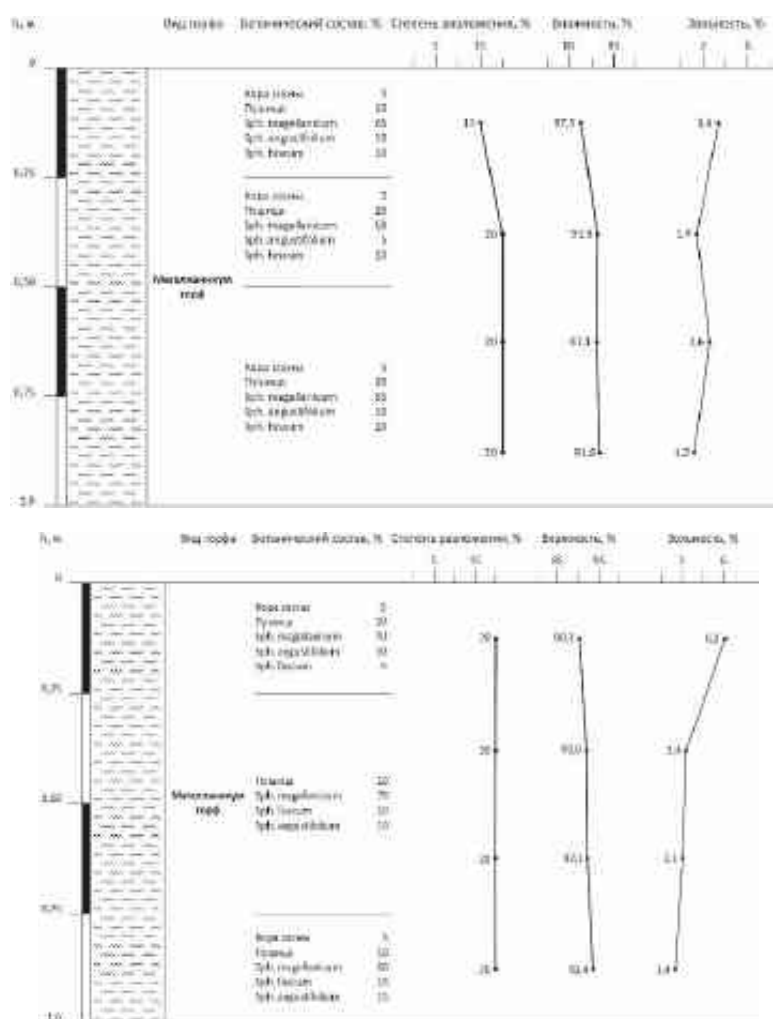


Рис. 2. Стратиграфические колонки верхнего деятельного горизонта торфяной залежи торфяника Рудянец

Fig. 2. Stratigraphic columns of the upper active horizon of the Rudyants peat deposit

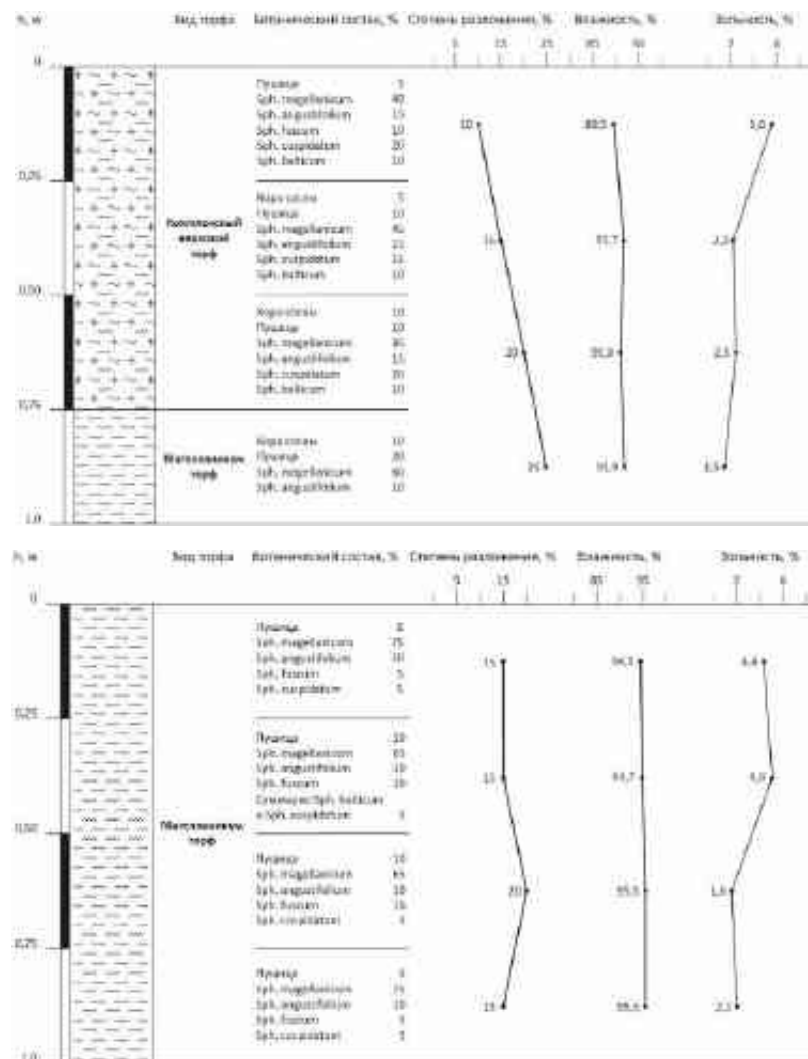


Рис. 3. Стратиграфические колонки верхнего деятельного горизонта торфяной залежи торфяника Червенское

Fig. 3. Stratigraphic columns of the upper active horizon of the peat deposit in the Chervenskoye peat bog

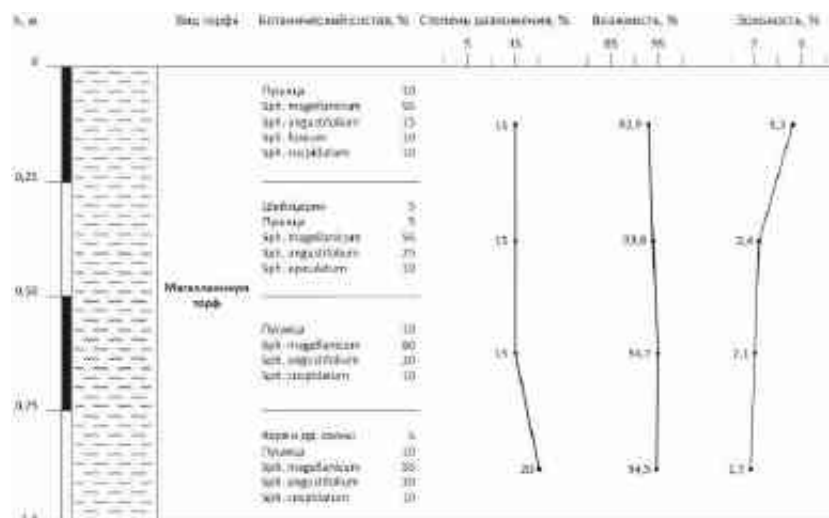


Рис. 4. Стратиграфическая колонка верхнего деятельного горизонта торфяной залежи торфяника Копыш

Fig. 4. Stratigraphic column of the upper active horizon of the peat deposit of the Kopysh peat bog

Гидротехническая мелиорация для лесохозяйственного использования в районе исследований началась совместно с работами, проводимыми по мелиорации земель колхозов и совхозов еще в 1955 г. Основной объем строительства осушительной сети происходил в период 1960–1973 гг. и был направлен, прежде всего, на понижение УГВ.

Разреженная схема осушения для лесохозяйственного использования включала сброс воды по валовым в магистральные каналы (располагаются через 500–1000 м) и далее самотеком в реки-водоприемники. Глубина залегания грунтовых вод в вегетативный период составляла более 0,5 м. Ранее было установлено, что зона влияния магистральных каналов на верховых торфяниках составляет 100–250 м, валовых каналов – 50–100 м [6–8].

Сложившийся специфический гидрологический режим после осушения на исследуемых верховых болотах обуславливал неблагоприятный водно-воздушный режим как для произрастания лесохозяйственных культур, так и для болотной растительности. Увеличение расходных составляющих водного баланса осушенных торфяников за счет интенсивного стока грунтовых болотных вод по действующей осушительной сети, особенно в весеннее половодье, привело к перераспределению их запасов на прилегающих территориях и понижению УГВ. На исследуемых торфяниках вдоль мелиоративных каналов происходили процессы деградации болотных фитоценозов, однако в частях болота, куда не распространялась зона влияния каналов, сохранилась фаза развития первичного очага заболачивания с устойчивыми общими чертами процессов формирования болотных фитоценозов верхового типа третьей фазы развития болотных массивов со слабо выпуклым рельефом поверхности и с преобладанием сосново-кустарничково-сфагновых и сфагново-мочажинных фитоценозов.

Осушение отрицательно сказалось на интенсивности роста массива в вертикальном направлении. На нарушенных участках исследуемых торфяников древесный ярус представлен обгоревшим сухостоем березы и сосны, а также порослью березы (высотой 0,5–2,5 м) и сосны (0,1–2,0 м). В кустарничковом ярусе преобладают багульник болотный, подбел, вереск обыкновенный с площадью покрытия до 100 %; из полукустарничковых – черника, голубика, брусника небольшими участками преимущественно вдоль суходолов, нулевой границы торфяника и лесных дорог. В напочвенном покрове в понижениях встречаются сфагновые мхи (площадь покрытия – 20–50 %), редко – пушица влагалищная.

Гидрологический режим болот за период наблюдений обуславливался достаточным атмосферным увлажнением – в среднем 684 мм в год. Однако отмечались засушливые периоды и периоды избыточного увлажнения. За одиннадцатилетний период исследований наблюдались годы разной водности, в засушливые годы выпадало около 430 мм (2014–2015 гг.) и около 660 мм (2018–2019 г.), а в наиболее влажные годы – свыше 700 мм (2016–2018, 2020–2021 гг.). В теплое время года – с апреля по октябрь – в среднем выпадало 421 мм, т. е. приблизительно 66 % годового количества осадков. Среднегодовая температура воздуха находилась в пределах от +7,9 до +9,1 °C [9].

До экологической реабилитации на нарушенных участках торфяников большую часть года грунтовые воды (УГВ) располагались на уровне 0,32 м ниже поверхности земли, а в меженный период УГВ опускались до отметок 0,80–1,11 м ниже поверхности земли. Среднемесячная амплитуда колебаний УГВ нестабильна на протяжении всего гидрологического года и менялась в широком диапазоне: 0,10–0,99 м (рис. 5). В зимний период УГВ составлял 0,26–0,67 м ниже поверхности земли. Подъем грунтовых вод начинался одновременно с началом снеготаяния. Величина весеннего подъема составляла 0,18–0,36 м. Величина деятельного горизонта, в котором активно шли процессы минерализации верхнего слоя торфяной залежи, достигала 1,11 м.

Проведенный ранее анализ состава грунтовых (болотных) вод исследуемых верховых торфяников до экологической реабилитации (в 2014–2016 гг.), т. е. находящихся в нарушенном состоянии, показал, что они характеризовались более нейтральной реакцией среды – от 4,1 до 7,6, а их минерализация достигала 125 мг/л, что нехарактерно для верховых болот Беларуси, находящихся в естественном состоянии [14]. Среди анионов преобладали гидрокарбонаты HCO_3^- (9,9–11,10 мг/л), хлориды Cl^- (6,8–31,5 мг/л) и фосфаты PO_4^{3-} (3,79), содержание других анионов было невелико. В составе катионов преобладали кальций Ca^{2+} (2,8–25,8), магний Mg^{2+} (1,43–45,06), калий K^+ (14,3) и азот аммонийный NH_4^+ (3,21–10,9) [6]. В отношении содержания аммония NH_4^+ , хлорида Cl^- , фосфат-иона PO_4^{3-} и иона калия K^+ можно констатировать, что это были достаточно высокие уровни антропогенного загрязнения. Воды характеризовались гидрокарбонатно-хлоридным аммонийно-кальциево-магниевым составом, нехарактерным для верховых болот, находящихся в естественном состоянии.

Изменение водного режима и неоднократные торфяные пожары на всех исследуемых участках привели к замедлению или прекращению процессов накопления органического вещества, и болотная экосистема потеряла устойчивость к самовосстановлению. Это негативно повлияло на экологическую обстановку района. Формировавшиеся в этих условиях болотные фитоценозы не соответствовали ботаническому составу в верхних слоях торфяной залежи. Эмиссия диоксида углерода с площади исследуемых нарушенных торфяников, рассчитанная по методике [10], составляла 11,3 тыс. т в год.

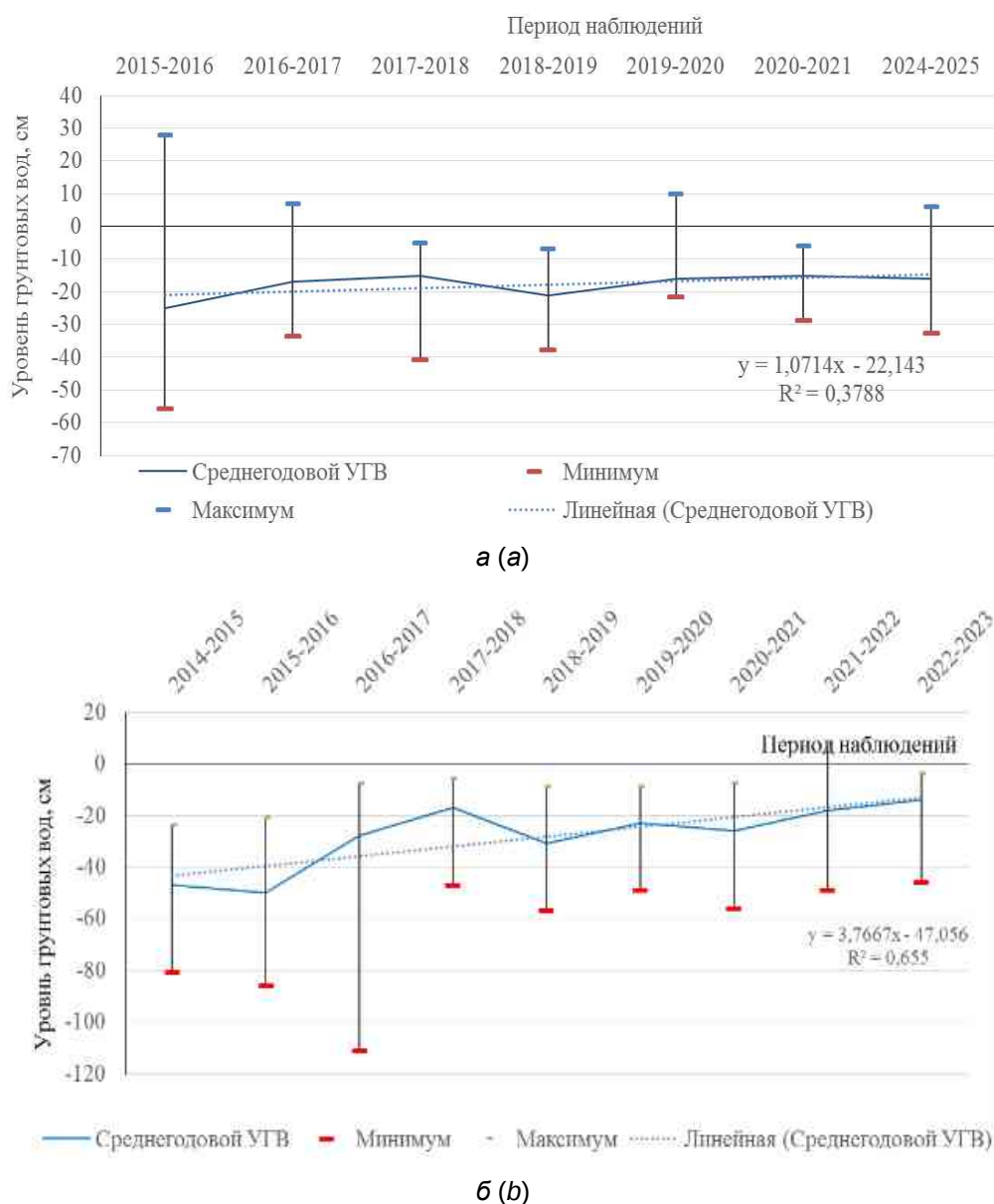


Рис. 5. Режим грунтовых вод на ключевых участках торфяников Рудянец (а), Копыш (б)

Fig. 5. Groundwater regime in key areas of Rudyants (a) and Kopysh (b) peatlands

Возвращение нарушенных торфяников в естественное состояние осуществлялось путем проведения мероприятий экологической реабилитации, направленных на восстановление, прежде всего, УГВ, свойственных болоту в естественном состоянии. Эти мероприятия были реализованы на болотном массиве Червенское в осенне-зимний период 2006 г. и на болотных массивах Копыш и Рудянец (участок Червень) в 2015 г. в рамках проектов международной технической помощи «ПРООН-ГЭФ».

На первой стадии повторного заболачивания после проведения мероприятий экологической реабилитации, направленных на накопление влаги (повторное увлажнение) в деятельном слое торфяной залежи, произошло снижение ее аэрируемости и, как следствие, усиление восстановительных процессов и ослабление окислительных. На всех участках ускорились процессы восстановления болотной растительности, характерной для верховых болот исследуемого района: происходило замещение вышних ярусов на нижние. Крутые берега магистральных каналов ушли под воду, вдоль бровки каналов наблюдалось угнетение древесного яруса (березы) и шли процессы зарастания пушицей влагалищной *Eriophorum vaginatum* и осокой топяной *Carex limosa*. Наблюдалось увеличение площади покрытия сфагновыми мхами *Sph. magellanicum*, *Sph. angustifolium* и др. На начальной стадии зарастания магистральных каналов большую роль в составе сообществ играли сплошные заросли белокрыльника. Валовые каналы интенсивно зарастали пушицей и сфагнумом.

Наблюдения за параметрами УГВ восстанавливаемых участков торфяников верхового типа позволили сделать выводы о положительной динамике уровней уже в первые годы после проведения мероприятий экологической реабилитации. Среднегодовые значения УГВ в этот период составили от 0,09 до 0,35 м ниже поверхности земли. Наблюдалась прямая корреляция УГВ с количеством выпавших осадков и обратная – с температурой воздуха.

После экологической реабилитации ход линии УГВ в течение гидрологического года существенно изменился, деятельный горизонт уменьшился до 0,6 м. Также прослеживалась динамика изменения УГВ в зависимости от сезона года: повышение УГВ весной в период интенсивного снеготаяния до 0,02 м выше поверхности земли и постепенное снижение уровней, достигающих летнего минимума, до 0,53 м ниже поверхности земли, что обуславливалось повышенным суммарным испарением с болот. Осеннее повышение уровней объясняется сокращением испарения в связи со снижением температуры воздуха.

Годовое изменение уровней характеризовалось высокими значениями УГВ в зимний и весенний периоды. Весенний подъем уровней в марте – апреле сменялся летне-осенним их снижением.

Положительный эффект от экологической реабилитации прослеживался и на смежном участке торфяника Рудянец, находившийся в естественном состоянии. Здесь наблюдались тренд повышения средних УГВ до 0,17 м ниже поверхности земли и сокращение деятельного горизонта на 0,10 м.

На второй стадии повторного заболачивания происходило увеличение обводненности за счет насыщения торфяной залежи водой. Влажность в верхнем слое (0,25 м) достигала 88–90 %, т. е. приблизилась к влажности торфа на ненарушенном участке, где она составляла 91–93 %. Сохранившиеся в естественном и находящиеся в восстанавливаемом состоянии участки верхового типа исследуемых торфяников площадью около 2,6 тыс. га стали выполнять газорегуляторную функцию. Ежегодно они начали выводить (поглощать) из атмосферы около 2,0 тыс. т диоксида углерода и выделять в атмосферу 1,8 тыс. т кислорода. Проведенные мероприятия экологической реабилитации способствовали сохранению в торфяной залежи этих торфяников около 2,1 млн т углерода, а также 57,7 млн т воды.

На исследуемых участках вследствие подъема УГВ происходит угнетение древесного яруса (березы), отмирание сухолюбивых ассоциаций и увеличение площади покрытия сфагновых мхов с преобладанием *Sph. magellanicum*, *Sph. angustifolium*, *Sph. fuscum* и др. Эта стадия развития болота может длиться весьма долгий период. При этом наблюдаются лишь некоторые изменения в соотношении растительных группировок и в их взаимном расположении.

Для данной стадии развития болот характерно образование кочек, гряд и мочажин. Такое изменение микрорельефа происходит потому, что ежегодный прирост различных видов сфагновых мхов неодинаков. Разным является и прирост торфа, образующегося из этих мхов, таких как *Sph. fuscum* и *Sph. angustifolium*. *Sph. fuscum* дает больший ежегодный прирост органического материала, а *Sph. angustifolium*, наоборот, меньший прирост торфа. Поскольку отдельные дернины сфагновых мхов остаются связанными с определенным участком произрастания в течение многих лет, это приводит к тому, что участки, занятые *Sph. angustifolium*, отстают в своем росте. Образующиеся таким образом углубления постепенно заполняются водой и превращаются в мочажины. Здесь уже *Sph. angustifolium* развиваться не может и сменяется другими мочажинными сфагновыми мхами (*Sph. Dusenii*, *Sph. balticum*, *Sph. cuspidatum*) и шейхцерией.

Гидрохимический режим вод повторно обводненных верховых болот в настоящее время формируется под воздействием совокупности факторов окружающей среды, важнейшими из которых являются атмосферные осадки, температура воздуха, влажность торфяной залежи и положение УГВ относительно поверхности болота.

Анализ гидрологического режима восстановленных болот показал, что среднемноголетние значения УГВ изменяются здесь в диапазоне от 0,10 м до 0,29 м ниже поверхности земли. Среднемноголетняя амплитуда колебаний УГВ не превышает 0,31–0,53 м. Величина деятельного горизонта составляет 0,34–0,58 м, т. е. сократилась в 2 раза. На всех исследуемых участках в грунтовых (болотных) водах преобладает слабовосстановительная геохимическая обстановка. На современном этапе развития (2025 г.) величина окислительно-восстановительного потенциала (Eh) этих вод составляет от +152 до +239 мВ. Воды кислые, величина pH 3,6–3,7, что соответствует болотам верхового типа, находящимся в естественном состоянии [11, 12]. Величина минерализации (по сумме ионов) составляет 37,8–56,8 мг/л, т. е. воды являются ультрапресными, что также характерно для верховых болот Беларуси в естественном состоянии. Изученные воды характеризуются очень высокой цветностью, достигающей 1361,0–1853,7 градусов, это обусловлено высоким содержанием растворенных в них органических веществ растительного происхождения (гуминовых и фульвовых кислот).

Грунтовые (болотные) воды на исследуемых участках характеризуются схожим катионным составом с преобладанием ионов кальция Ca^{2+} (4,0–8,1 мг/л), магния Mg^{2+} (2,34–2,43 мг/л), натрия Na^+ (0,9–6,4 мг/л) и анионным составом с преобладанием хлоридов Cl^- (10,3–21,0 мг/л), сульфатов SO_4^{2-} (4,4–17,3 мг/л) и нитратов NO_3^- (9,3–9,7 мг/л) (Рудянец и Червенское).

Таким образом, грунтовые (болотные) воды торфяников имеют достаточно сложный и весьма изменчивый химический состав. На торфяниках Рудянец и Червенское содержание в водах ионов Cl^- , NO_3^- и Na^+ несколько превышает уровни природного геохимического фона в грунтовых водах верховых болот Беларуси [13, 14], находящихся в естественных условиях, что можно рассматривать в качестве признаков небольших следов старого антропогенного загрязнения поверхностных вод. Это соответствует экологическому статусу данного торфяника, который восстанавливается в рамках мероприятий экологической реабилитации 2016 и 2008 г.

Закключение. Комплексные исследования гидрологического и гидрогеохимического режима верховых торфяников Борисово-Глусского торфяного района торфяно-болотной области крупных верховых и низинных болот пологоволнистой абляционной равнины Беларуси до и после повторного обводнения позволили выявить несколько стадий восстановления:

– *на нулевой стадии*, т. е. до начала экологической реабилитации, среднегодовой уровень грунтовых вод составлял 0,26–0,48 м ниже поверхности земли, а минимальные значения достигали 0,80–1,11 м ниже поверхности земли. Химический состав грунтовых вод характеризовался более нейтральной реакцией среды и большей минерализацией, достигавшей в некоторых случаях 124 мг/л, превышенным содержанием аммония NH_4^+ (до 10,0 мг/л), хлоридов Cl^- (до 31,5 мг/л), фосфат-ионов PO_4^{3-} (до 3,79 мг/л), кальция Ca^{2+} (до 25,8 мг/л), магния Mg^{2+} (до 45,6 мг/л), калия K^+ (до 14,3 мг/л). Это существенно превышало уровни естественного гидрогеохимического фона верховых болот и являлось результатом окислительной деструкции торфа либо прямого поступления антропогенного загрязнения. Воды характеризовались гидрокарбонатно-хлоридным, аммонийно-кальциево-магниевым составом, нехарактерным для верховых болот в естественном состоянии;

– *на первой стадии* восстановления после проведения мероприятия экологической реабилитации прослеживалось интенсивное поднятие среднегодовых УГВ в 2,0 раза, уменьшение деятельного горизонта в 1,6 раза. Это стадия перехода болота из фазы дополнительного грунтового питания в фазу атмосферного питания. Начиналось восстановление болотообразовательного процесса, который происходил до гидротехнической мелиорации;

– *на второй стадии* наблюдалась стабилизация среднегодовых уровней на отметках 0,09–0,24 м ниже поверхности земли, сокращение амплитуды колебаний УГВ до 0,28 м и деятельного горизонта до 0,25–0,40 м. Ход кривой УГВ относительно поверхности земли приобретал сглаженный характер. Отмечалось повышение влажности торфяной залежи деятельного горизонта при кислой реакции водной среды ($\text{pH} < 3,6$) и меньшей ее минерализации (29–56 мг/л). При этом воды характеризовались аммонийно-хлоридным, нитратно-хлоридным, натриево-магниевым-кальциевым составом.

Мероприятия экологической реабилитации исследуемых участков торфяников способствовали повышению среднегодовых значений УГВ до уровня поверхности земли, эмиссия сменилась поглощением и накоплением в торфяной залежи диоксида углерода. Эта стадия развития болота может длиться весьма длительный период и требует тщательного наблюдения. На данной стадии прогнозируются изменения в соотношении растительных группировок и их взаимном расположении, в скорости роста торфяной залежи и ежегодном приросте органического материала. Сформировавшийся благодаря проведенным мероприятиям гидрологический и гидрогеохимический режим положительно отразится на всех биосферных функциях болот, обеспечив устойчивую среду обитания для биологического разнообразия, восстановлении верховых болот, а также уменьшит вероятность возникновения пожаров на торфяниках.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках мероприятия 139 «Проведение наблюдений, оценка состояния торфяников» подпрограммы 5 «Национальная система мониторинга окружающей среды» государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2021–2025 годы.

Acknowledgements. The research was carried out as part of Activity 139 “Observations and Assessment of Peatlands” of Subprogram 5 “National Environmental Monitoring System” of the State Program “Environmental Protection and Sustainable Use of Natural Resources” for 2021–2025.

Список использованных источников

1. Иванов, К. Е. Гидрология болот / К. Е. Иванов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1953. – 296 с.
2. Carbon sequestration in riparian forests: A global synthesis and meta-analysis / К. Е. Dybala, V. Matzek, T. Gardali, N. E. Seavy // *Global Change Biology*. – 2019. – Vol. 25, № 1. – P. 57–67.
3. Об охране и использовании торфяников : Закон Респ. Беларусь от 18 дек. 2019 г. № 272-3.
4. Торф. Термины и определения : СТБ 2308-2013. – Мн. : Госстандарт : БелГИСС, 2013. – 47 с.

5. Пидопличко, А. П. Торфяные месторождения Белоруссии / А. П. Пидопличко; под ред. М. И. Нейштадт. – Мн. : Изд-во Акад. наук Бел. ССР, 1961. – 193 с.
6. Ракович, В. А. Восстановление нарушенного мелиорацией лесного болота Червенское (Галое) / В. А. Ракович, О. Н. Ратникова // Природопользование : сб. науч. тр. – Мн., 2012. – Вып. 21. – С. 155–165.
7. Ратникова, О. Н. Категории нарушенности гидрологического режима на торфяных месторождениях и болотах / О. Н. Ратникова // Молодежь в науке – 2014 : прил. к журн. «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» : в 5 ч. / Нац. акад. наук Беларусі [и др.] ; редкол.: С. А. Усанов (гл. ред.) [и др.]. – Мн. : Бел. навука, 2015. – Ч. 1 : Серия хим. наук. – С. 77–81.
8. Ратникова, О. Н. Оценка эффективности мероприятий экологической реабилитации на торфяном месторождении Рудянец I / О. Н. Ратникова // Молодежь в науке – 2017 : сб. материалов Междунар. конф. молодых ученых, Минск, 30 окт. – 2 нояб. 2017 г. : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларусі [и др.] ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Мн. : Бел. навука, 2018 ; Ч. 2. Гуманитарные, медицинские, физико-математические, физико-технические, химические науки. – С. 398–402.
9. Погода и климат. – URL: <https://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=by> (дата обращения: 07.04.2026).
10. Охрана окружающей среды и природопользование. Климат. Выбросы и поглощение парниковых газов. Правила расчета выбросов и поглощения от естественных болотных экосистем, осушенных торфяных почв, выработанных и разрабатываемых торфяных месторождений : ТКП 17.09-02-2011 (02120). – Мн. : Минприроды, 2011. – 21 с.
11. Шебеко, В. Ф. Гидрологический режим осушаемых территорий / В. Ф. Шебеко. – Мн. : Урожай, 1970. – 300 с.
12. Бамбалов, Н. Н. Роль болот в биосфере / Н. Н. Бамбалов, В. А. Ракович. – Мн. : Бел. навука, 2005. – 285 с.
13. Стандарт отрасли. Воды подземные, классификация по химическому составу и температуре : ОСТ 41-05-263-86. – М. : ВСЕГИНГЕО, 1986. – 14 с.
14. Кудельский, А. С. Региональная гидрогеология и геохимия подземных вод Беларуси / А. С. Кудельский, В. И. Пашкевич. – Мн. : Бел. навука, 2014. – 271 с.

References

1. Ivanov K. E. *Gidrologiya bolot* [Hydrology of wetlands]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1953, 296 p. (in Russian)
2. Dybala K. E., Matzek V., Gardali T., Seavy N. E. Carbon sequestration in riparian forests: A global synthesis and meta-analysis. *Global Change Biology*, 2019, vol. 25, no 1, pp. 57–67.
3. Zakon Respubliki Belarus' ot 18 dekabrya 2019 g. № 272-Z «*Ob ohrane i ispol'zovanii torfyanikov*» [Law of the Republic of Belarus of December 18, 2019 No. 272-Z “On the Protection and Use of Peatlands”].
4. STB 2308-2013 *Torf. Terminy i opredeleniya* [Standard of the Republic of Belarus (SRB) 2308-2013 Peat. Terms and Definitions]. Minsk, State Standard, BelGISS Publ., 2013, 47 p. (in Russian)
5. Pidoplichko A. P. *Torfyanyye mestorozhdeniya Belorussii* [Peat deposits of Belarus]. Ed. by M. I. Neishtadt. Minsk, Publ. House of the Academy of Sciences of the Byelorussian SSR, 1961, 193 p. (in Russian)
6. Rakovich V. A., Ratnikova O. N., *Vosstanovlenie narushennogo melioratsionnogo lesnogo bolota Chervenskoye (Galoe)* [Restoration of the Chervenskoye (Galoe) forest swamp damaged by melioration]. *Prirodopol'zovanie: sbornik nauchnykh trudov* [Nature management: a collection of scientific papers]. Minsk, 2012, no. 21, pp. 176–189 (in Russian)
7. Ratnikova O. N. *Kategorii narushennosti gidrologicheskogo rezhima na torfyanix mestorozhdeniyax i bolotax* [Categories of disturbance of the hydrological regime in peat deposits and swamps] / *Molodezh' v nauke – 2014 : pril. k zhurn. “Vesci Natsyonal'noj akademii navuk Belarusi”*. v 5 ch. [Youth in Science – 2014 : supplement to the journal “News of the National Academy of Sciences of Belarus”: in 5 parts] / *Nacz. akad. nauk Belarusi [i dr.] ; redkol.: S. A. Usanov (gl. red.) [i dr.]* [National Academy of Sciences of Belarus [et al.]; editorial board: S. A. Usanov (editor-in-chief) [et al.]]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2015, Ch. 1. *Seriya xim. Nauk* [Part 1. Chemical series. sciences], pp. 77–81. (in Russian)
8. Ratnikova O. N. *Ocenka effektivnosti meropriyatij ekologicheskoy rehabilitatsii na torfyanom mestorozhdenii Rudyanecz I* [Evaluation of the effectiveness of environmental rehabilitation measures at the Rudyanets I peat deposit] // *Molodezh' v nauke – 2017 : sb. materialov Mezhdunar. konf. molodykh uchenykh*, Minsk, 30 okt. – 2 noyab. 2017 g. : v 2 ch. / *Nacz. akad. nauk Belarusi [i dr.] ; redkol.: V. G. Gusakov (gl. red.) [i dr.]* [Youth in Science – 2017: collection of materials from the International Conf. of Young Scientists, Minsk, October 30 – November 2, 2017: in 2 parts] / *National Academy of Sciences of Belarus [et al.] ; editorial board: V. G. Gusakov (editor-in-chief) [et al.]*. Minsk : Belaruskaya Navuka Publ., 2018. Ch. 2. *Gumanitarnyye, medicinskie, fiziko-matematicheskie, fiziko-texnicheskie, ximicheskie nauki* [Part 2. Humanities, medical, physical and mathematical, physical and technical, chemical sciences], pp. 398–402. (in Russian)
9. *Pogoda i klimat* [Weather and climate.]. URL: <https://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=by> (accessed April 7, 2026). (in Russian)
10. ТКП 17.09-02-2011 (02120) *Oxrana okruzhayushhej sredy i prirodopol'zovanie. Klimat. Vybrosoy i pogloshhenie parnikovyx gazov. Pravila rascheta vybrosov i pogloshheniya ot estestvennykh bolotnykh ekosistem, osushennykh torfyanix pochv, vyrabotannykh i razrabatyvaemykh torfyanix mestorozhdenij* [Environmental Protection and Nature Management. Climate. Greenhouse Gas Emissions and Removals. Rules for Calculating Emissions and Removals from Natural Wetland Ecosystems, Drained Peat Soils, and Existing and Developed Peat Deposits]. Minsk, Ministry of Natural Resources Publ., 2013, 23 p. (in Russian)

11. Shebeko V. F. *Gidrologicheskij rezhim osushaemy'x territorij* [Hydrological regime of drained areas]. Minsk, Urozhaj Publ., 1970, 300 p. (in Russian)
12. Bambalov N. N., Rakovich V. A. *Rol' bolot v biosphere* [The role of swamps in the biosphere]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2005, 285 p. (in Russian)
13. OST 41-05-263-86 *Standart otrasli. Vody podzemnye, klassifikaciya po ximicheskomu sostavu i temperature* [Industry standardization system (ISS) Industry Standard. Groundwater Classification by Chemical Composition and Temperature]. Moscow, VSEGINGEO Publ, 1986. 14 p. (in Russian)
14. Kudel'skij A. S., Pashkevich V. I. *Regional'naya gidrogeologiya i geoximiya podzemnyx vod Belarusi* [Regional hydrogeology and geochemistry of groundwater in Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2014. 271 p. (in Russian)

Информация об авторах

Ратникова Ольга Николаевна – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: 306peatlands@mail.ru

Пашкевич Василий Иванович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: pashkevich@nature-nas.by

Борш Анна Тадеушевна – научный сотрудник Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: anna.borsh.1992@mail.ru

Макаренко Татьяна Ивановна – научный сотрудник Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tanyulchik.m@gmail.com

Information about the authors

Olga N. Ratnikova – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Leading Researcher Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: 306peatlands@mail.ru

Vasily I. Pashkevich – Ph. D. (Geological and Mineral Sciences), Leading Researcher Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: pashkevich@nature-nas.by

Anna T. Borsh – Research Fellow Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: anna.borsh.1992@mail.ru

Tatiana I. Makarenko – Research Fellow Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tanyulchik.m@gmail.com

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ
GEOLOGY. MINERALS<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-183-191>

УДК 622.691.24:553.981.8(476)

Поступила в редакцию 09.04.2026

Received 09.04.2026

**АНАЛИЗ И ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА
В ВОДОРАСТВОРЕННЫХ ГАЗАХ КОНТРОЛЬНЫХ ГОРИЗОНТОВ
ОСИПОВИЧСКОГО ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ГАЗА
(РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ)****В. Г. Левашкевич¹, В. В. Майоров², В. Г. Аусев², Н. Н. Луговский², А. С. Глаз³**¹*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь;*²*Открытое акционерное общество «Газпром трансгаз Беларусь», Минск, Беларусь;*³*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные с особенностями эксплуатации Осиповичского подземного хранилища газа (ПХГ), вызванные сложностью его геологического строения. В процессе эксплуатации хранилища уже много лет наблюдаются перетоки природного газа из области его хранения в вышележащие горизонты, где этот газ растворяется в пластовых водах и попутно формирует низконапорные скопления, как правило, в контрольных горизонтах. В этой связи, основные исследования работы направлены на анализ содержания метана в водорастворенных газах контрольных горизонтов по данным геоэкологического мониторинга Осиповичского ПХГ и выявление мест его спорадических скоплений в отложениях геологической структуры.

Кратко приводится информация о геологическом строении структуры ПХГ с учетом данных, полученных в ходе его эксплуатации. Особое внимание уделяется покрышке хранилища и контрольным горизонтам в его пределах.

Приводятся результаты геоэкологического мониторинга содержания метана в водорастворенных газах контрольных горизонтов хранилища в виде графиков его изменения во времени и распространения по площади. Приведенные результаты исследований направлены на повышение эффективности эксплуатации Осиповичского ПХГ путем вовлечения в промышленный оборот низконапорных скоплений природного газа в контрольных горизонтах хранилища.

Ключевые слова: подземное хранилище газа; геологическая структура; метан; водорастворенные газы; контрольный горизонт.

Для цитирования. Левашкевич В. Г., Майоров В. В., Аусев В. Г., Луговский Н. Н., Глаз А. С. Анализ и оценка содержания метана в водорастворенных газах контрольных горизонтов Осиповичского подземного хранилища газа (Республика Беларусь) // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 183–191.

**ANALYSIS AND ASSESSMENT OF METHANE CONTENT
IN WATER-DISSOLVED GASES OF CONTROL HORIZONS
AT THE OSIPOVICH UNDERGROUND GAS STORAGE
(REPUBLIC OF BELARUS)****V. G. Levashkevich¹, V. V. Mayorov², V. G. Ausev², N. N. Lugovski², A. S. Glaz³**¹*Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;*²*Gazprom Transgaz Belarus Open Joint Stock Company, Minsk, Belarus;*³*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

Abstract. The article examines issues related to the operational features of the Osipovichi underground gas storage (UGS) facility, conditioned by the complexity of its geological structure. Over many years of operation, natural gas migration from the storage area into overlying horizons has been observed. In these horizons, the gas dissolves in formation waters and concurrently forms low-pressure accumulations, typically within control horizons. In this regard, the primary research

focuses on analyzing the methane content in the water-dissolved gases of the control horizons based on geo-ecological monitoring data from the Osipovich UGS and identifying areas of sporadic gas accumulations within the geological structure.

The paper briefly provides information on the geological structure of the UGS facility, incorporating data obtained during its operation. Special attention is paid to the storage caprock and the control horizons within its limits. The results of geo-ecological monitoring regarding methane content in the water-dissolved gases of the storage's control horizons are presented as graphs showing temporal variations and spatial distribution. The research findings are aimed at improving the operational efficiency of the Osipovich UGS by involving low-pressure natural gas accumulations in the control horizons into industrial use.

Keywords: underground gas storage; geological structure; methane; water-dissolved gases; control horizon.

For citation. Levashkevich V. G., Mayorov V. V., Ausev V. G., Lugovski N. N., Glaz A. S. Analysis and assessment of methane content in water-dissolved gases of control horizons at the Osipovich underground gas storage (Republic of Belarus). *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 183–191.

Введение. Энергетическая безопасность страны во многом зависит от надежности поставки необходимых объемов природного газа, которые осуществляются по газотранспортной системе ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». Особое место в ней отводится подземным хранилищам газа, которые используются чаще всего для регулирования сезонной неравномерности газопотребления и сглаживания суточных потребностей газа в регионе [1, 2]. Их эксплуатация позволяет обеспечивать надежное и эффективное функционирование магистральных газопроводов и оптимизировать подачу и распределение газа среди потребителей. Для этих целей преимущественно используются ПХГ в водоносных пористых пластах геологических структур, позволяющих обеспечивать хранение больших объемов газа. Вместе с тем ПХГ, являясь крупным промышленным объектом, состоящим из наземной и подземной частей, соединенных системой газопроводов и скважин, оказывает определенное воздействие на окружающую среду и подземные воды, дестабилизируя их газо- и геохимическое состояние [3–5]. Так как природный газ состоит преимущественно из метана (до 98 %), то его растворение в пластовых водах приводит к значительному количественному изменению в составе водорастворенных газов.

Осиповичское ПХГ создано в пластах-коллекторах верхнепротерозойских отложений (вендский комплекс пород) в пределах Жуковского блока Осиповичского поднятия фундамента [6, 7]. Оно введено в эксплуатацию в 1976 г. как часть газотранспортной системы Беларуси, повышая ее надежность и обеспечивая бесперебойное газоснабжение. Объект хранения газа и контрольные горизонты расположены в отложениях древней покровно-ледниковой формации ранневендского континентального оледенения. Такие отложения характеризуются очень сложным геологическим строением, выражающимся в невыдержанности и резко меняющейся мощности слоев и пачек разного литологического состава, частым выклиниванием и фаціальным замещением толщ, изменчивости первичной гипсометрии пачек и фильтрационно-емкостных свойств слагающих их пород [6, 7].

Одним из главных недостатков ПХГ в пористых пластах является наличие пластовых потерь газа, которые могут быть вызваны геологическими и, в меньшей мере, техническими и технологическими причинами. Геологические причины являются наиболее сложными для обнаружения и устранения. Они обусловлены, в большей степени, особенностями геологического строения в пределах геологической структуры и часто не поддаются идентификации и исключению. Технические и технологические причины связаны с качеством строительства и эксплуатации скважин, системой транспортировки газа и технологическими работами по обеспечению отбора-закачки газа с помощью газотранспортного оборудования и газопроводной сети. Такие потери могут быть сведены к минимуму в процессе эксплуатации ПХГ.

Как правило, в процессе эксплуатации ПХГ в пористых пластах переток газа происходит по геологическим неоднородностям («литологическим окнам») или негерметичностям заколонного пространства скважин в вышележащие отложения, где он растворяется в пластовых водах и попутно формирует спорадические скопления свободного газа, обычно, в контрольных горизонтах. Такие перетоки газа с образованием техногенных газовых скоплений отмечаются в пределах Осиповичского ПХГ и присущи многим хранилищам в водоносных пористых пластах [4, 5].

Поступление природного газа в водоносные горизонты приводит к увеличению концентрации метана в водорастворенных газах, что является индикатором перетока природного газа из области его хранения. Выполняя регулярные исследования пластовых вод по оценке содержания метана в водорастворенных газах, можно судить об интенсивности перетока газа в вышележащие отложения и места его скопления, о герметичности заколонного пространства отдельных скважин, наличии «литологических окон» в пределах геологической структуры и др.

Цель работы – определить содержание метана в водорастворенных газах контрольных горизонтов в ходе геоэкологического мониторинга Осиповичского ПХГ и выявить места его скопления в отложениях геологической структуры. Дальнейшее вовлечение таких скоплений газа в промышленный оборот является весьма актуальной задачей для Осиповичского ПХГ.

В геологическом строении Осиповичского ПХГ принимают участие отложения вильчанской и валдайской серий вендской системы, породы девонской, юрской, меловой и четвертичной систем [7, 8].

Песчаники блонской свиты, залегающие в подошве вильчанской серии, использованы в качестве пород-коллекторов для подземного хранения газа. Глусская свита, охватывающая большую часть объема пород вильчанской серии, представлена преимущественно тиллитами, переслаиванием песчаных и глинистых пачек пород и служит покрывкой для газовой залежи.

На рис. 1 приведен геологический разрез структуры Осиповичского ПХГ, характеризующий строение и расположение основных горизонтов в ее пределах, уточненный по фактическим данным полученными в процессе многолетней эксплуатации хранилища [9, 10].

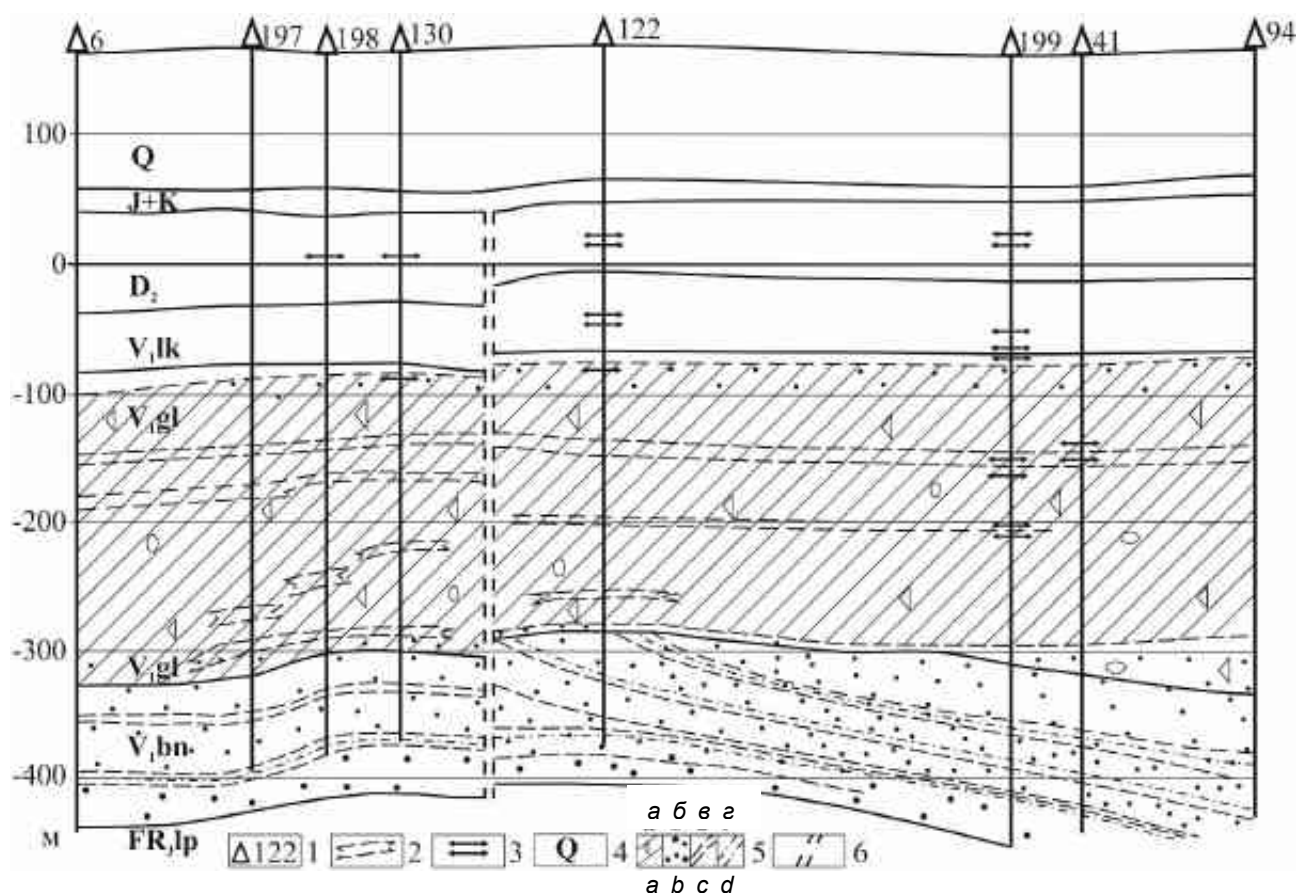


Рис. 1. Геологический субмеридиональный разрез структуры Осиповичского ПХГ:
 1 – скважина и ее номер; 2 – проницаемые пропластки в тиллитовой толще;
 3 – гидродинамически активные пропластки; 4 – геологический индекс; 5 – породы
 (а – тиллиты, б – пески и песчаники, в – глины, г – алевролиты); 6 – разлом земной коры

Fig. 1. Geological sub-meridional cross-section of the Osipovichi UGS structure:
 1 – well and its number; 2 – permeable interbeds in the tillite sequence;
 3 – hydrodynamically active interbeds; 4 – geological symbol; 5 – rocks
 (a – tillites, b – sands and sandstones, c – clays, d – siltstones); 6 – crustal fault

Характерной особенностью Осиповичского ПХГ является наличие субширотного разлома земной коры, разделяющего структуру на две неравные по площади части.

Блонские отложения по литологическим и фациальным признакам условно подразделяются на несколько пропластков (пачек), часть из которых распространена повсеместно, а другие выклиниваются в западной и частично центральной частях структуры. Породы-коллекторы таких пачек в настоящее время используются в качестве объектов для подземного хранения газа. Они сложены мелкозернистыми, средне-мелкозернистыми разностями с небольшим количеством крупного песка и гравия и глинистого вещества (5–9 %) в составе пород. Характеризуются относительно высокой пористостью (до 24 %) и проницаемостью (до 6,0 Д) [11, 12].

Породы-коллекторы блонской свиты перекрываются мощной толщей отложений глусской свиты, представленными тиллитами, с которыми ассоциируют пески, песчаники, горизонтально-микрослоистая порода, алевролиты и глины. На долю тиллитов приходится от 80 до 90 % объема свиты [7, 8]. Породы свиты по особенностям вещественного состава и структурно-текстурным признакам разделяются на не постоянные по мощности и содержанию глинистого вещества и составу пород обособленные толщи тиллитов. Песчаные и алевроито-глинистые пропластки в толще тиллитов и в межтиллитовых пачках располагаются часто гнездообразно и не образуют выдержанных по площади слоев. Проницаемость тиллитовой толщи составляет 0,02–0,08 мД, что представляет их в качестве непроницаемой покрышки для газа при его хранении в пластах-коллекторах нижележащих отложений [8, 11, 12].

Над толщами тиллитов, являющихся основной покрышкой хранилища, залегают отложения лукомльской свиты венда, а также породы девонской, юрской, меловой и четвертичной систем.

Маломощные толщи юрских и меловых отложений сохранились в пределах ПХГ, в основном, в углублениях дочетвертичного рельефа. Представлены они глинами песчанистыми, известковистыми, песками мелкозернистыми, а также переслаиванием мела и глины песчанистой. Суммарная мощность мезо-кайнозойских и четвертичных отложений составляет в среднем 120 м.

Контрольные горизонты ПХГ. Один из выдержанных пропластков, представленных преимущественно проницаемыми песчаниками в верхней части разреза глусской свиты, является *первым контрольным горизонтом хранилища*. Он характеризуется высокой гидропроводностью (1611 Д·см/сПз), проницаемостью (1,466 Д) и пьезопроводностью (77 400 см²/с) [11, 12].

Вторым контрольным горизонтом хранилища служит глинисто-алеврито-песчанистая толща в нижней части лукомльской свиты венда. Породы пачки плотные, крепкие, массивной и слоистой текстуры. По геофизическим данным их открытая пористость составляет в среднем 21 %, проницаемость – 0,5–6,0 Д, гидропроводность изменяется от 5400 до 10900 Д·см/сПз, пьезопроводность – от 5200 до 85 500 м²/с. В северо-западной части хранилища проницаемость песчаников рассматриваемого контрольного горизонта по данным испытания контрольных скважин в этой части структуры колеблется в пределах 2–6 Д.

Отложения лукомльской свиты венда играют важную роль в технологическом обеспечении эксплуатации ПХГ. В пределах этих образований возможны техногенные скопления низконапорного газа (метана) за счет его поступления из нижележащих толщ по геологическим неоднородностям или негерметичностям заколонного пространства отдельных скважин. В настоящее время лукомльская свита контролируется 11 скважинами фонда ПХГ.

Опыт эксплуатации ПХГ показывает, что первый и второй контрольные горизонты гидродинамически сообщаются в пределах структуры.

Породы лукомльской свиты повсеместно перекрыты девонскими отложениями, нижняя карбонатная известняково-доломитовая часть которых (мощностью до 13 м) распространена повсеместно в пределах структуры и является *третьим контрольным горизонтом* на Осиповичском ПХГ. Породы этого горизонта имеют высокие коллекторские и фильтрационно-емкостные свойства. Их открытая пористость по данным геофизических исследований скважин (ГИС) изменяется от 14 до 29 % (в среднем 21 %), проницаемость – от 0,5 до 2,6 Д.

Особенностью второго и третьего контрольных горизонтов является их значительная выположенность в пределах структуры – отсутствие выраженного замкнутого структурного контура и наличие гидродинамической связи, что вносит определенные трудности при контроле газодинамического режима горизонтов. В свою очередь, верхняя глинисто-мергельная пачка девонских отложений не выдержана по литолого-фациальному составу и мощности, на части площади опесчанивается и частично выклинивается в западном направлении, что приводит к гидродинамической связи между третьим контрольным горизонтом и четвертичными отложениями.

Геоэкологический мониторинг ПХГ. В пределах Осиповичского ПХГ с участием авторов создана и эффективно действует система геоэкологического мониторинга, направленная на оценку содержания метана в водорастворенных газах подземных горизонтов, расположенных выше основного пласта-коллектора, предназначенного для хранения промышленных объемов природного газа.

Геоэкологический мониторинг является составной частью технологической системы контроля и наблюдения за процессами хранения газа на Осиповичском ПХГ и проводится в соответствии с Методическим руководством [3]. Кроме решения основных вопросов, связанных с регулярным наблюдением за состоянием природной, в том числе, геологической среды в районе деятельности ПХГ, большое внимание уделяется оценке дестабилизации газового состава природных вод по разрезу и площади хранилища, особенно в контрольных горизонтах. Как правило, такая дестабилизация вызвана вертикальными и горизонтальными перетоками газа из пласта-коллектора в процессе эксплуатации газовой залежи. Определение мест (зон, участков, «литологических окон») и интенсивности таких перетоков является одной из главных задач геоэкологического мониторинга в процессе эксплуатации ПХГ.

Главными объектами мониторинга являются воды контрольных горизонтов хранилища. Ежегодно проводится отбор проб природных вод по установленной системе из контрольных скважин с целью определения удельной газонасыщенности вод и содержания метана в растворенных в воде газах. Исследования проводятся два раза в год, преимущественно в нейтральные периоды эксплуатации ПХГ: весной – при минимальных объемах газа и пластовых давлениях в газовой залежи, и осенью – в период полного заполнения хранилища газом и максимальных давлениях в газовой залежи [13]. Отобранные пробы воды дегазируются по установленной методике в лабораторных условиях, определяется их удельное газонасыщение и концентрация метана в водорастворенных газах хроматографическим методом с использованием автоматизированного измерительного комплекса «Хромос ГХ-1000». Комплекс зарегистрирован в Государственном реестре средств измерения в Республике Беларусь. Основные газо- и геохимические параметры пластовых вод по каждому объекту исследований сведены в базу данных.

Ежегодными исследованиями охвачено более 20 контрольных и наблюдательных глубоких скважин фонда ПХГ, вскрывших напорные воды в пределах хранилища.

На рис. 2 и 3 приведены данные и графики, отражающие характер изменения во времени концентрации метана в водорастворенных газах третьего и второго контрольных горизонтов соответственно за последний 25-летний период исследований. Как правило, новые данные за каждый последующий сезон (год) исследований либо резко отличаются от имеющихся материалов, отмечая изменение тенденции содержания метана в воде скважин во времени в ту или другую сторону, либо близки к предыдущим показаниям, подтверждая установленную тенденцию. Приведенные сведения позволяют оценить характер насыщения вод переточным метаном и его содержание в водорастворенных газах скважин указанных контрольных горизонтов хранилища. Исследуемые скважины расположены в различных частях структуры хранилища, в том числе и за пределами контура газо-водяного контакта.

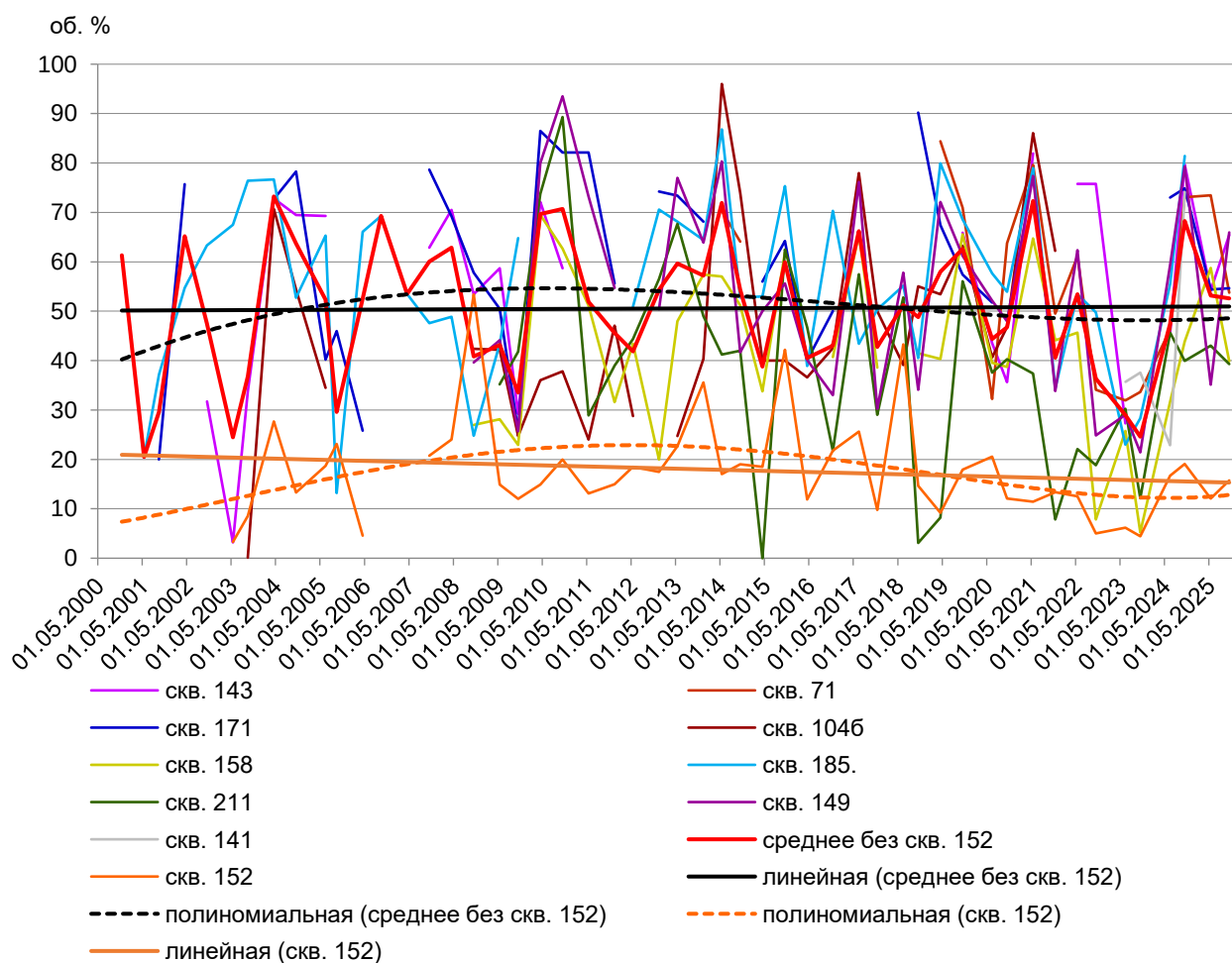


Рис. 2. Динамика концентрации метана в водорастворенных газах скважин третьего контрольного горизонта за период исследований 2000–2025 гг.

Fig. 2. Methane concentration trends in water-dissolved gases of the third control horizon wells (2000–2025)

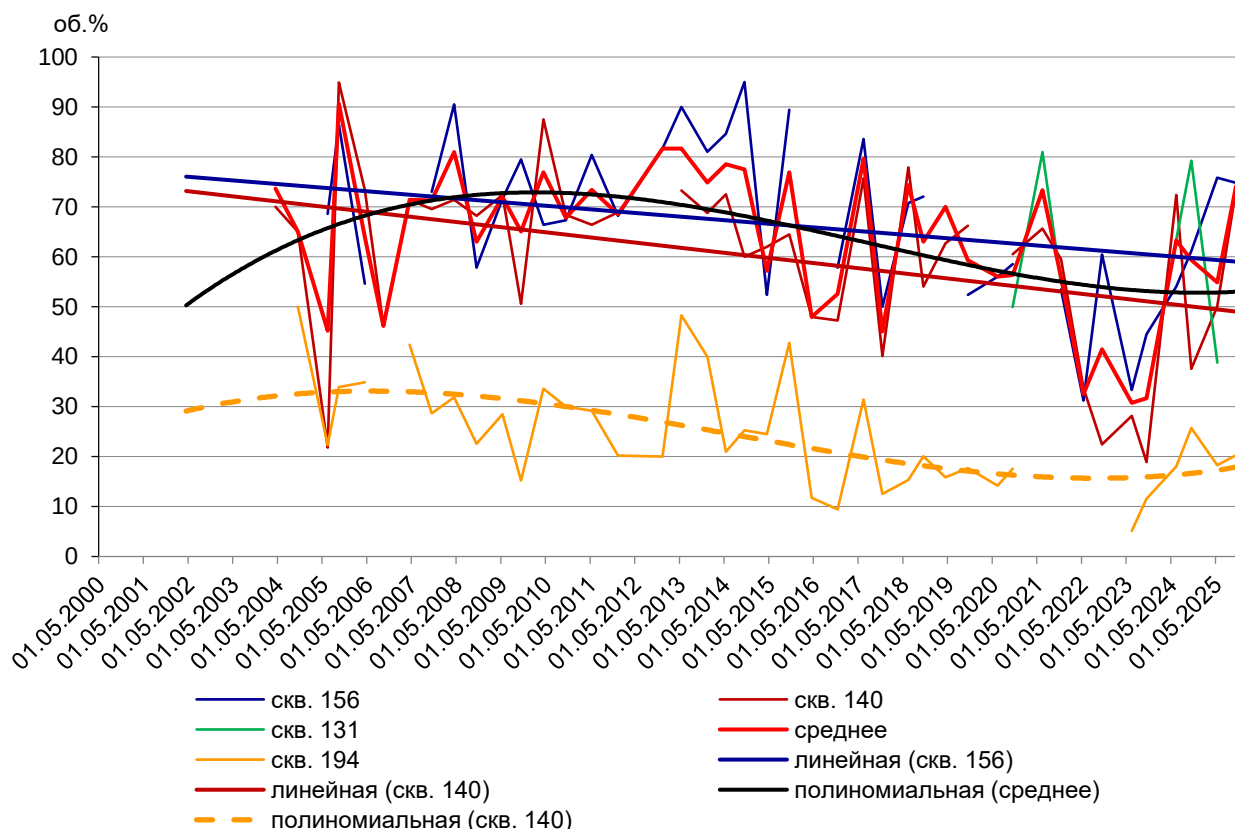


Рис. 3. Динамика концентрации метана в водорастворенных газах скважин второго контрольного горизонта за период исследований 2000–2025 гг.

Fig. 3 Methane concentration trends in water-dissolved gases of the second control horizon wells (2000–2025)

Обсуждение результатов и заключение. Приведенные на рис. 2 и 3 графики позволяют отметить наиболее характерные периоды времени насыщения метаном вод третьего и второго контрольных горизонтов. На этих рисунках приведены данные по скважинам, расположенным преимущественно в зоне хранения газа. Скважина 152 удалена от этой зоны, а скважина 194 расположена, предположительно, за зоной разлома, в связи с чем их графики приведены отдельно.

Среднее содержание метана в водорастворенных газах третьего контрольного горизонта на всем временном интервале составляет 50 об.%, что соответствует 20 см³ метана в 1 л воды (средняя удельная газонасыщенность вод отложений составляет в среднем 40 см³/л).

Содержание метана в водах второго контрольного горизонта в рассматриваемый период времени несколько отличается от содержания метана в водах третьего контрольного горизонта. Из данных можно отметить, что в 2005–2015 гг. среднее содержание метана в водах отложений лукомльской свиты венда по скважинам центральной части структуры составляло около 70 об.% с дальнейшим снижением в последующие годы до 50–55 об.%, определяя тенденцию уменьшения концентрации метана в водах этих отложений за весь период исследований.

В целом для вод рассматриваемых контрольных горизонтов центральной и периферийных частей структуры отмечается относительно слабый и синхронный колебательный характер содержания метана в водорастворенных газах с максимальными значениями в период 2005–2016 гг. (положительная ветвь полиномиальной аппроксимационной линии) и снижением в последующие годы (отрицательная ветвь аппроксимационной линии). Такое поведение содержания метана в водах рассматриваемых контрольных горизонтов может быть связано с технологическими особенностями эксплуатации хранилища, включая более интенсивную разгрузку таких горизонтов с помощью системы сбора, подготовки и использования низконапорного газа в последние годы [14]. Установленные тенденции изменения содержания метана в водах третьего и второго контрольных горизонтов хранилища свидетельствует об установившихся процессах переноса метана в вертикальном и горизонтальном направлениях в пределах структуры ПХГ. Синхронный характер изменения содержания метана в водах этих горизонтов подтверждает факт их гидродинамической сообщаемости.

Схема изолиний содержания метана в водорастворенных газах третьего контрольного горизонта Осиповичского ПХГ в 2008 г. вместе с его значениями для вод отдельных скважин второго и первого контрольных горизонтов приведена на рис. 4.

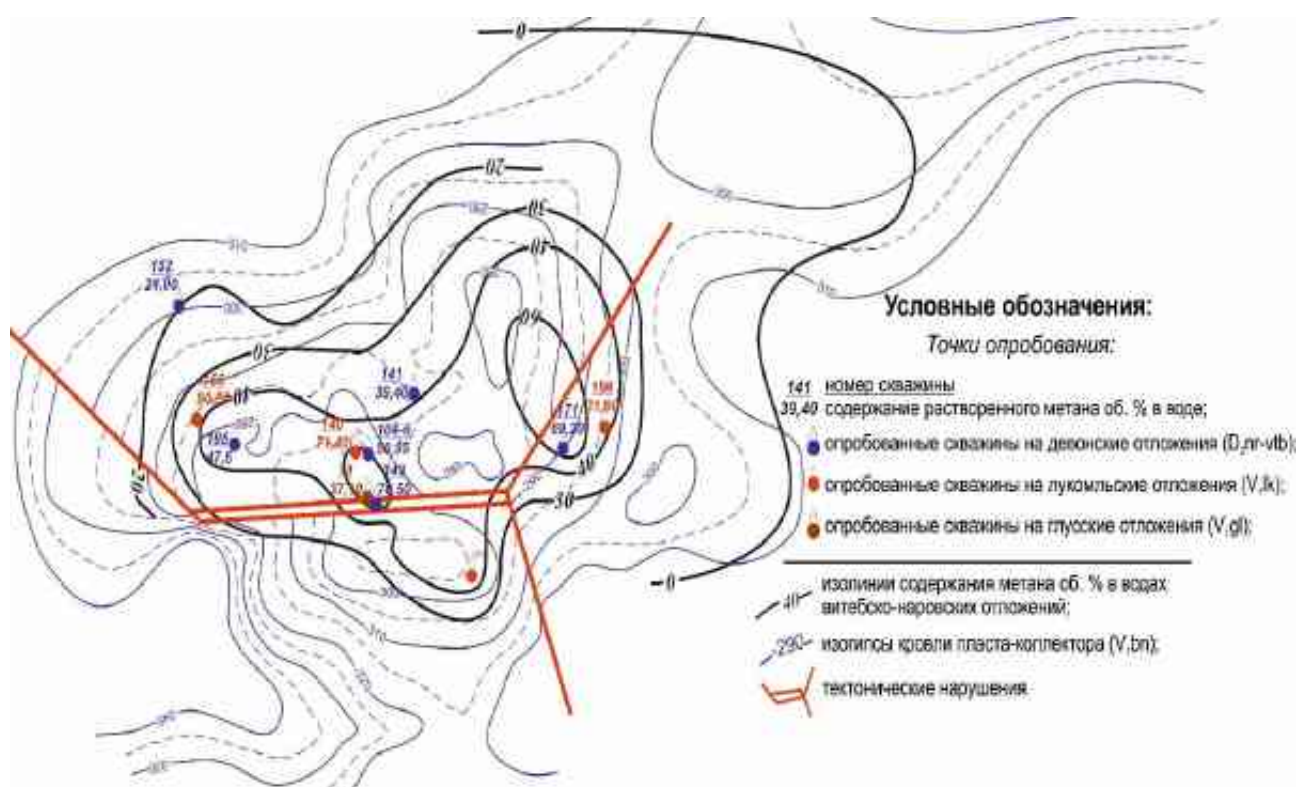


Рис. 4. Схема распространения метана в водорастворенных газах третьего контрольного горизонта и значения концентрации метана по отдельным скважинам второго и первого горизонтов (об.%) Осиповичского ПХГ, 2008 г.

Fig. 4. Methane distribution scheme in water-dissolved gases of the third control horizon and methane concentration values for individual wells of the second and first horizons (vol.%) at the Osipovich UGS facility, 2008

Данные, приведенные на схеме, позволяют проследить распространение по площади ПХГ метана в водорастворенных газах третьего контрольного горизонта. Отмечается повышенная концентрация метана в водах восточной и западной частей структуры, а также в южном структурном блоке ПХГ, охватывая скважину 131 второго контрольного горизонта. Если учесть выположенность структурного плана девонских отложений (отсутствие замкнутого структурного контура в пределах площади ПХГ), то можно сделать заключение, что зона повышенных значений концентрации метана в водорастворенных газах третьего контрольного горизонта формируется в большей степени под влиянием геолого-структурных особенностей отложений блонской свиты и образуется преимущественно за счет субвертикального перетока газа по «литологическим окнам» и заколонному пространству скважин. Аналогичная картина распространения метана в водорастворенных газах третьего контрольного горизонта даже с более выраженными значениями наблюдается и в другие годы эксплуатации хранилища. Например, в 2010, 2014, 2019, 2021 и 2024 г. концентрация метана в водорастворенных газах по ряду исследованных скважин превышала 70 об. %.

Следует отметить, что практически все высокие значения содержания метана в водах скважин второго контрольного горизонта находятся в пределах области высоких показаний содержания метана в водах третьего контрольного горизонта, что подтверждает связь их гидро-, газодинамических систем и единую природу их аномально высоких значений. Однако данная ситуация полностью контролируема и зарегулирована, так как на ПХГ организован постоянный и эффективный сбор низконапорного газа из контрольных горизонтов и его использование в производственно-хозяйственной деятельности ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». В целом можно констатировать отсутствие негативного влияния процессов эксплуатации ПХГ на состояние недр и окружающей среды в пределах существующего горного отвода.

Список использованных источников

1. Магистраль : Белтрансгаз, 1960–2010 / Р. И. Юдина, С. А. Бойков, В. И. Чеков, В. В. Ясюченя ; под ред. В. В. Майорова. – Мн. : Белстан, 2010. – 256 с.
2. Войтов, П. М. Развитие подземных хранилищ газа в Республике Беларусь / П. М. Войтов, Н. Н. Луговский, Н. А. Криштопа // Газовая промышленность. – 2015. – № 9. – С. 22–24.
3. Геоэкологический мониторинг на объектах подземного хранения газа в Республике Беларусь (методическое руководство) / А. В. Кудельский, В. И. Сухачев, Ц. Д. Сорохан [и др.]. – Мн. : ОАО «Белтрансгаз», Ин-т геологических наук НАН Беларуси, 2003. – 34 с.
4. Богданович, Н. А. Актуальность проблемы выбросов природного газа в атмосферу и их источники / Н. А. Богданович // Трубопроводный транспорт и инженерные сети. – 2021. – Вып. 39 (109). – С. 159–161.
5. Казанкова, Э. Р. Геоэкологические проблемы подземного хранения газа в России / Э. Р. Казанкова, Н. В. Корнилова // Геология нефти и газа. – 2016. – № 3. – С. 102–108.
6. Кожемякина, И. А. Геологическое строение восточного склона Белорусской антеклизы / И. А. Кожемякина // Поисково-разведочные работы по подземному хранению газа в СССР. – 1971. – Вып. 10. – С. 47–56.
7. Рифей и венд Белоруссии / А. С. Махнач, Н. В. Веретенников, В. И. Шкуратов, В. Е. Бордон ; под ред. А. С. Махнач. – Мн. : Наука и техника, 1976. – 360 с.
8. Геология Беларуси / А. С. Махнач [и др.] ; редкол.: А. С. Махнач, Р. Г. Гарецкий, А. В. Матвеев (отв. ред.) [и др.]. – Мн. : Ин-т геологических наук НАН Беларуси, 2001. – 815 с.
9. Айзберг, Р. Е. Тектоника Оршанской впадины / Р. Е. Айзберг, Р. Г. Гарецкий, И. В. Климович. – Мн. : Наука и техника, 1985. – 112 с.
10. Использование низконапорного природного газа для повышения энергоэффективности эксплуатации объектов магистральных газопроводов / В. В. Майоров, В. Г. Аусев, Н. Н. Луговский [и др.] // Энергетическая стратегия. – 2025. – № 6. – С. 48–51.
11. Кузнецов, И. В. Исходные данные для составления технологической схемы опытной закачки газа на Осиповичской площади (Белорусская ССР), в целях создания подземного газохранилища / И. В. Кузнецов, И. А. Кожемякина, А. В. Володин // Труды треста «Союзбургаз». – 1970. – Вып. 10. – С. 85–94.
12. Результаты комплексной обработки материалов разведочного бурения и гидродинамических исследований, проводившихся на Осиповичской площади / И. А. Кожемякина, К. Ф. Пальцева, И. Б. Савчук, З. Е. Троилова // Труды треста «Союзбургаз». – 1970. – Вып. 9. – С. 76–82.
13. Левашкевич, В. Г. Система геоэкологического мониторинга подземных хранилищ газа в Республике Беларусь / В. Г. Левашкевич, А. С. Глаз, С. Е. Шпак // Актуальные проблемы наук о Земле: исследование трансграничных регионов : сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф., приуроч. к 1000-летию г. Бреста, Брест, 12–14 сент. 2019 г. / Ин-т природопользования НАН Беларуси, Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина, Брест. гос. техн. ун-т. ; редкол.: А. К. Карабанов, М. А. Богдасаров, А. А. Волчек. – Брест : БрГУ, 2019. – Ч. 2. – С. 244–249.
14. Система разработки низконапорного газа Осиповичского ПХГ / С. А. Хан, О. В. Макарьев, В. Г. Аусев [и др.] // Газовая промышленность. – 2025. – № 3. – С. 20–25.

References

1. Yudina R. I., Boykov S. A., Chekov V. I., Yasyuchenya V. V. *Magistral'* [Magistral]. Minsk, Belstan Publ., 2010, 256 p. (in Russian)
2. Voytov P. M. *Razvitiye podzemnykh khranilishch gaza v Respublike Belarus'* [Development of underground gas storage facilities in the Republic of Belarus]. *Gazovaya promyshlennost = Gas Industry*, 2015, no. 9, pp. 22–24. (in Russian)
3. Kudel'skiy A. V., Sukhachev V. I., Sorokhan Ts. D., Rudenok A. A., Krishtopa, O. N. *Geoekologicheskiy monitoring na ob'ektakh podzemnogo khraneniya gaza v Respublike Belarus' (Metodicheskoe rukovodstvo)* [Geoeological monitoring at underground gas storage facilities in the Republic of Belarus (Methodological guide)]. Minsk, JSC Beltransgaz Publ., IGN NAS of Belarus Publ., 2003, 34 p. (in Russian)
4. Bogdanovich N. A. *Aktual'nost' problemy vybrosov prirodnogo gaza v atmosferu i ikh istochniki* [Relevance of atmospheric natural gas emissions and their sources]. *Truboprovodnyy transport i inzhenernyye seti = Pipeline transport and engineering networks*, 2021, no. 39 (109), pp. 159–161. (in Russian)
5. Kazankova E. R., Kornilova N. V. *Geoekologicheskiye problemy podzemnogo khraneniya gaza v Rossii* [Geoeological problems of underground gas storage in Russia]. *Geologiya Nefti I Gaza = Russian Oil And Gas Geology*, 2016, no. 3, pp. 102–106. (in Russian)
6. Kozhemyakina I. A. *Geologicheskoye stroyeniye vostochnogo sklona Belorusskoy anteklizy* [Geological structure of the eastern slope of the Belarusian anteklise]. *Poiskovo-razvedochnyye raboty po podzemnomu khraneniyu gaza v SSSR = Exploration and appraisal for underground gas storage in the USSR*, Moscow, 1971, pp. 47–56. (in Russian)
7. Makhnach A. S., Veretennikov N. V., Shkuratov V. I., Bordon V. E. *Rifey i vend Belorussii* [Riphean and Vendian of Belorussia]. *Nauka i tekhnika = Science and Technology*, Minsk, 1976, 360 p. (in Russian)
8. Makhnach A. S., Garetskiy R. G., Matveev A. V. et al. *Geologiya Belarusi* [Geology of Belarus]. Minsk, IGN NAS of Belarus, 2001, pp. 76–386. (in Russian)
9. Ayzberg R. E., Garetskiy R. G., Klimovich I. V. *Tektonika Orshanskoy vpadiny* [Tectonics of the Orsha depression]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1985, 112 p. (in Russian)

10. Mayorov V. V., Ausev V. G., Lugovskiy N. N., Lukashevich A. A., Krasnovskiy S. V., Kotyashev G. G. *Ispol'zovaniye nizkonapornogo prirodnogo gaza dlya povysheniya energoeffektivnosti ekspluatatsii ob'yektov magistral'nykh gazoprovodov* [Use of low-pressure natural gas to increase the energy efficiency of main gas pipeline operations]. *Energeticheskaya Strategiya* = Energy Strategy, 2025, no. 6, pp. 48–51. (in Russian)
11. Kuznetsov I. V., Kozhemyakina I. A., Volodin A. V. *Iskhodnyye dannyye dlya sostavleniya tekhnologicheskoy skhemy opytной zakachki gaza na Osipovichskoy ploshchadi (Belorusskaya SSR), v tselyakh sozdaniya podzemnogo gazokhranilishcha* [Initial data for developing the process flow scheme of experimental gas injection at the Osipovichi area (Byelorussian SSR) for the creation of an underground gas storage facility]. *Trudy tresta Soyuzburgaz* = Proceedings of the Soyuzburgaz Trust, Moscow, 1970, no. 6, pp. 85–94. (in Russian)
12. Kozhemyakina I. A., Pal'tseva K. F., Savchuk I. B., Troilova Z. E. *Rezul'taty kompleksnoy obrabotki materialov razvedchnogo bureniya i gidrodinamicheskikh issledovaniy, provodivshikhsya na Osipovichskoy ploshchadi* [Results of integrated processing of exploratory drilling data and hydrodynamic testing conducted at the Osipovichi area]. *Trudy Tresta Soyuzburgaz* = Proceedings of the Soyuzburgaz Trust, Moscow, 1970, no. 9, pp. 76–82. (in Russian)
13. Levashkevich V. G., Glaz A. S., Shpak S. E. *Sistema geoekologicheskogo monitoringa podzemnykh khranilishch gaza v Respublike Belarus'* [Geoecological monitoring system for underground gas storage facilities in the Republic of Belarus]. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle: issledovanie transgranichnykh regionov: sbornik materialov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii, priurochennoy k 1000-letiyu g. Bresta* [Current problems of Earth sciences: research of transboundary regions: collection of materials of the IV International scientific and practical conf. dedicated to the 1000th anniversary of Brest]. Brest, BrGU Publ., 2019, vol. 2, pp. 244–249. (in Russian)
14. Khan S. A., Makar'ev O. V., Ausev V. G. et al. *Sistema razrabotki nizkonapornogo gaza Osipovichskogo PKHG* [Development system for low-pressure gas at the Osipovichi UGS facility]. *Gazovaya Promyshlennost'* = Gas Industry, 2025, no. 3, pp. 20–25. (in Russian)

Информация об авторах

Левашкевич Владимир Георгиевич – доктор геолого-минералогических наук, заместитель академика-секретаря Отделения химии и наук о Земле НАН Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, г. Минск, Беларусь). E-mail: levashk@presidium.bas-net.by

Майоров Владимир Владимирович – генеральный директор ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» (ул. Некрасова, 9, 220040, г. Минск, Беларусь). E-mail: vladimir.mayorov@btg.by

Аусев Владимир Георгиевич – первый заместитель генерального директора – главный инженер ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» (ул. Некрасова, 9, 220040, г. Минск, Беларусь). E-mail: v.ausev@btg.by

Луговский Николай Николаевич – заместитель главного инженера – начальник производственного отдела подземного хранения газа ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» (ул. Некрасова, 9, 220040, г. Минск, Беларусь). E-mail: nikolay.lugovski@btg.by

Глаз Александр Сергеевич – научный сотрудник Института природопользования НАН Беларуси (ул. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Information about the authors

Vladimir G. Levashkevich – D. Sc. (Geology and Mineralogy), The National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Belarus). E-mail: levashk@presidium.bas-net.by

Vladimir V. Mayorov – General Director JSC Gazprom transgaz Belarus (9, Nekrasova St., 220040, Minsk, Belarus). E-mail: vladimir.mayorov@btg.by

Vladimir G. Ausev – First Deputy General Director – Chief Engineer JSC Gazprom transgaz Belarus (9, Nekrasova St., 220040, Minsk, Belarus). E-mail: v.ausev@btg.by

Nikolay N. Lugovski – Deputy Chief Engineer – Head of the Underground Gas Storage Department JSC Gazprom transgaz Belarus (9, Nekrasova St., 220040, Minsk, Belarus). E-mail: nikolay.lugovski@btg.by

Alexander S. Glaz – researcher at the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОЕНИЯ ПРОДУКТИВНОЙ ТОЛЩИ И ПОДСЧЕТ ЗАПАСОВ ЛЕНТОЧНЫХ ГЛИН МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ГАЙДУКОВКА» С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. А. Якушев, А. Л. Киндеев

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В настоящей статье рассмотрены возможности применения геоинформационных технологий для трехмерного моделирования геологического строения и подсчета запасов месторождений ленточных глин. Исследование выполнено на примере участка месторождения «Гайдуковка» Минского района Минской области площадью 5,76 км². На основе анализа архивных материалов бурения, составляющих 195 скважин, и топографических планов сформирована пространственно привязанная база геологических данных с детальностью изучения 29 538,46 м² на одну скважину. Выполнено построение цифровых моделей рельефа, кровли и подошвы глинистого пласта в среде ArcGIS Pro с использованием модуля 3D Analyst. Для оценки объемов полезного ископаемого и вскрышных пород применен метод разности поверхностей на основе TIN-моделей. Получены количественные оценки геометрических объемов глинистой толщи и вскрыши, проанализированы особенности их пространственного распределения и соотношения. Показана возможность использования трехмерного ГИС-моделирования не только для оценки прогнозных запасов, но и для анализа фактической добычи и контроля разработки месторождения. Применение метода разности поверхностей позволило определить суммарный геометрический объем глинистой толщи в пределах полигона горного отвода, который составил 65,44 млн м³, а также объем вскрышных пород – 23,0 млн м³. Соотношение указанных показателей свидетельствует о благоприятных горно-геологических условиях разработки месторождения. Результаты исследования подтверждают эффективность применения ГИС-платформ для решения задач предварительной и оперативной оценки запасов неметаллических полезных ископаемых и могут быть использованы в проектных, научных и образовательных целях. Предложенная методика может быть рекомендована для использования в проектно-исследовательских работах, при планировании разработки месторождений общераспространенных полезных ископаемых, а также в учебных и научных целях как пример интеграции современных ГИС-технологий в практику геологии и горных наук.

Ключевые слова: геоинформационные системы; трехмерное моделирование; TIN-модель; цифровая модель рельефа; объемный анализ; недропользование; горно-геологические информационные системы.

Для цитирования. Якушев А. А., Киндеев А. Л. Трехмерное моделирование строения продуктивной толщи и подсчет запасов ленточных глин месторождения «Гайдуковка» с применением геоинформационных технологий // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 192–203.

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THE STRUCTURE OF THE PRODUCTIVE STRATUM AND CALCULATION OF RESERVES OF RIBBON CLAYS OF THE GAIDUKOVKA DEPOSIT USING GEOINFORMATION TECHNOLOGIES

A. A. Yakushev, A. L. Kindeev

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. This article discusses the possibilities of using geoinformation technologies for three-dimensional modeling of the geological structure and calculating reserves of belt clay deposits. The study was carried out using the example of the site of the Haidukovka deposit in the Minsk region of the Minsk region, with an area of 5.76 km². Based on the analysis of archival drilling materials comprising 195 wells and topographic plans, a spatially linked database of geological data was formed, with a study detail of 29,538.46 m² per well. Digital models of the relief, roof, and bottom of the clay formation were built in the ArcGIS Pro environment using the 3D Analyst module. The surface difference method based on TIN models was used to estimate the volume of minerals and overburden. Quantitative estimates of the geometric volumes of clay strata and overburden have been obtained, and the features of their spatial distribution and ratios have been analyzed. The possibility of using three-dimensional GIS modeling is shown not only for estimating forecast reserves, but also for analyzing actual production and monitoring field development. The application of the surface difference method made it possible to determine the total geometric volume of clay strata within the landfill of the mining allotment, which amounted to 65.44 million m³, as well as the volume of overburden rocks – 23.0 million m³. The ratio of these indicators indicates favorable mining and geological conditions for the development of the deposit. The results of the study confirm the effectiveness of GIS platforms for solving the tasks of preliminary and operational assessment of non-metallic mineral

reserves and can be used for design, scientific and educational purposes. The proposed methodology can be recommended for use in design and survey work, in planning the development of deposits of common minerals, as well as for educational and scientific purposes as an example of the integration of modern GIS technologies into the practice of geology and mining sciences.

Keywords: geoinformation systems; three-dimensional modeling; TIN-model; digital relief model; volumetric analysis; subsurface use; mining and geological information systems.

For citation. Yakushev A. A., Kindeev A. L. Three-dimensional modeling of the structure of the productive stratum and calculation of reserves of ribbon clays of the Gaidukovka deposit using geoinformation technologies. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 192–203.

Введение. Геоинформационные технологии в настоящее время находят широкое применение практически во всех сферах науки и производства. За последние три десятилетия уровень использования геоинформационных систем (ГИС) в горнодобывающей отрасли существенно возрос, и трехмерное моделирование стало неотъемлемым элементом процессов поиска, разведки и освоения месторождений полезных ископаемых. Одним из ключевых направлений в данной области является моделирование строения четвертичной толщи. В последние годы заметно возрос интерес к использованию ГИС для моделирования и оптимизации проектных технологических решений по отработке запасов месторождений. Это связано с возможностью системного учета больших объемов исходных данных и их интеллектуальной графической интерпретации.

Особенностью геологических данных, используемых в ГИС горного профиля, является сложность количественной оценки их достоверности. Поскольку цифровое моделирование предполагает адекватное отображение природных объектов, любые неточности исходной информации приводят к искажению проектных, технологических и управленческих решений. При существенных ошибках это может стать причиной возникновения нештатных или аварийных ситуаций в производстве.

Достоверные сведения о количественных и качественных характеристиках ресурсного потенциала, интеллектуальная обработка данных и их сопоставление с нормативно-правовой базой недропользования создают основу для формирования новых геоинформационных моделей в горно-геологических информационных системах (ГГИС). Такие модели учитывают как особенности горно-геологической структуры, так и специфику нормативно-методической базы проектирования разработки месторождений [1].

Современный этап развития горно-геологических исследований характеризуется не столько переходом от разрозненных двумерных представлений к трехмерным цифровым моделям месторождений, которые начали активно применяться еще в 1990-е годы [2], сколько их дальнейшим развитием и усложнением. Трехмерные модели рассматриваются как динамичные пространственные системы, интегрирующие разнородные геологические, геофизические и горнотехнические данные, обеспечивающие возможность многовариантного анализа, учета неопределенности и поддержки управленческих решений на всех стадиях освоения месторождений. Такие модели выступают не только инструментом визуализации, но и основой для количественного анализа, планирования горных работ и принятия управленческих решений. Поскольку поиск поверхностных или приповерхностных месторождений полезных ископаемых становится все более сложным, для разведки закрытых месторождений все чаще применяется трехмерное геологическое моделирование на основе ГИС [3].

В отличие от специализированных горно-геологических программных комплексов, универсальные ГИС-платформы ориентированы на работу с широким спектром пространственных данных и не всегда напрямую адаптированы к задачам недропользования. Однако их развитые средства пространственного анализа, трехмерной визуализации и работы с поверхностями создают предпосылки для использования таких систем в качестве инструмента предварительной оценки запасов, в частности для месторождений неметаллических полезных ископаемых, требующих сложного геостатистического аппарата [4].

В связи с вышесказанным, цель настоящего исследования заключается в разработке методики моделирования строения месторождений полезных ископаемых с использованием геоинформационных систем. Полученные результаты могут быть применены при проектировании и оптимизации разработки месторождений глин и других неметаллических полезных ископаемых, в геологоразведочных и изыскательских работах для повышения точности моделирования и оценки запасов, в образовательных и научных целях в качестве примеров использования современных ГИС-технологий в горной геологии, а также для совершенствования информационных систем недропользования, требующих интеграции и визуализации больших объемов геологических данных.

Состояние изученности вопроса. Количественная оценка запасов полезного ископаемого опирается прежде всего на методы пространственной статистики. Формальная теория скрининга и ряд базовых концепций геостатистики были разработаны в трудах Ж. Матерона и его школы в 1970-е годы [5–7],

что создало математическую базу для оценки средних значений и неопределенности по точечным данным керна и бурения. С развитием доступных электронно-вычислительных машин и графических рабочих станций в 1970–80-е годы появились коммерческие и специализированные решения для геологии и горного планирования. Один из наиболее известных пакетов – Surpac – начал коммерческую дистрибуцию в начале 1980-х годов [8]. Тогда же формировались компании Gemcom, Datamine и другие, внедрявшие рабочие процессы учета данных бурения, блочного моделирования и проектирования работ. Эти продукты впервые объединили базы керновых данных, простые 3D-визуализации и блочные оценки запасов на практике [9].

В академической среде в конце 1980-х – начале 1990-х годов был разработан GOCAD (Geological Object Computer Aided Design) – программная платформа, ориентированная на трехмерное представление геологических тел, структурную интерпретацию и топологически корректное построение поверхностей. Это дало мощные инструменты для интеграции геологической, геофизической и буровой информации в единую 3D-модель [10]. С 1990-х годов по настоящее время происходило сращивание: 3D-геологические пакеты (GOCAD, Move и др.) и индустриальные решения (Surpac, Datamine, MineSight) начали обмениваться данными с ГИС-системами, появились методики вокселей, объемных (блочных) моделей и интеграции атрибутов [11]. Одновременно активно развивалась практика стохастического моделирования (передача неопределенности в оценках) [12], а также визуализация для горных инженеров и регуляторов.

Одними из первых опубликованных примеров практического применения ГИС в задачах количественной оценки минерального потенциала являются работы М. Скотта (2000), где рассмотрены моделирование благоприятных зон и оценка числа потенциально неоткрытых месторождений в Квинсленде (Австралия) [13]. В отечественной литературе можно встретить первые примеры использования ГИС ArcView для подсчета уже добытого ископаемого на примере месторождения строительного камня (базальта) [14]. В более актуальных статьях выделяют подсчет запасов и составление плана развития горных работ на указанных месторождениях с применением пакета программ ArcGIS и MapInfo на примере Риштанского месторождения красных глин (Узбекистан) [15].

Актуальность настоящего исследования определяется тем, что, несмотря на широкое распространение цифровых технологий в горнодобывающей отрасли, наиболее значимые новые работы по созданию комплексных трехмерных геологических моделей месторождений, в частности с использованием программного продукта ArcGIS Pro, практически отсутствуют, несмотря на то что позитивное влияние IT-технологий на геологическую науку и практику уже трудно оспорить [16]. Приложение от компании ESRI традиционно позиционируется как универсальная ГИС-платформа с развитым инструментарием пространственного анализа и 3D-визуализации, однако его потенциал для задач подсчета запасов и построения цифровых двойников месторождений до настоящего времени недостаточно изучен. Исследование возможностей интеграции и адаптации программного продукта к задачам построения цифровой модели месторождений и оценки запасов не только восполняет существующий научно-методический пробел, но и открывает перспективы для разработки рабочих процессов в области цифровой геологии и недропользования. Дополнительным фактором актуальности является возрастающая потребность в цифровизации архивных геологических материалов и их интеграции в современные информационные системы. Перевод данных бурения и топографических планов в цифровую форму с последующим трехмерным моделированием позволяет не только сохранить и актуализировать накопленные сведения, но и существенно расширить возможности их аналитического использования, включая переоценку запасов, анализ пространственной структуры продуктивных толщ и сопоставление проектных и фактических показателей разработки.

Объект и методы исследований. Объектом исследования послужил участок месторождения ленточных глин «Гайдуковка» Минского района Минской области, с гипсометрией по состоянию на 1967 г. (рис. 1). Общая площадь месторождения, с прилегающими территориями – 7,52 км², территории горного отвода – 5,76 км². В рамках территории отвода пробурено 195 скважин, учтенных к подсчету. Детальность изучения составляет 29 538,46 м² на одну скважину.

Расположено в пределах юго-восточной части Нарочано-Вилейской низменности. Полезное ископаемое залегает на моренных отложениях сожского подгоризонта припятского горизонта. Поверхность характеризуется мелко- и среднехолмистым рельефом. Абсолютные отметки поверхности месторождения изменяются от 207,8 до 231 м, в северной части достигают 240–250 м. Мощность четвертичных отложений в районе месторождения «Гайдуковка» изменяется от 160 до 200 м, на Минской возвышенности, расположенной юго-западнее и южнее, – от 170 до 272 м. Моренные отложения сожского подгоризонта припятского горизонта встречены скважинами в центральной части месторождения, иногда выходят на поверхность. Они слагают на месторождении дно ледниковой котловины, которая заполнена озерно-ледниковыми и озерно-аллювиальными аккумуляциями. Абсолютные отметки залегания поверхности моренных отложений колеблются от 185,6 м в центре месторождения до 215–220 м в краевых частях.

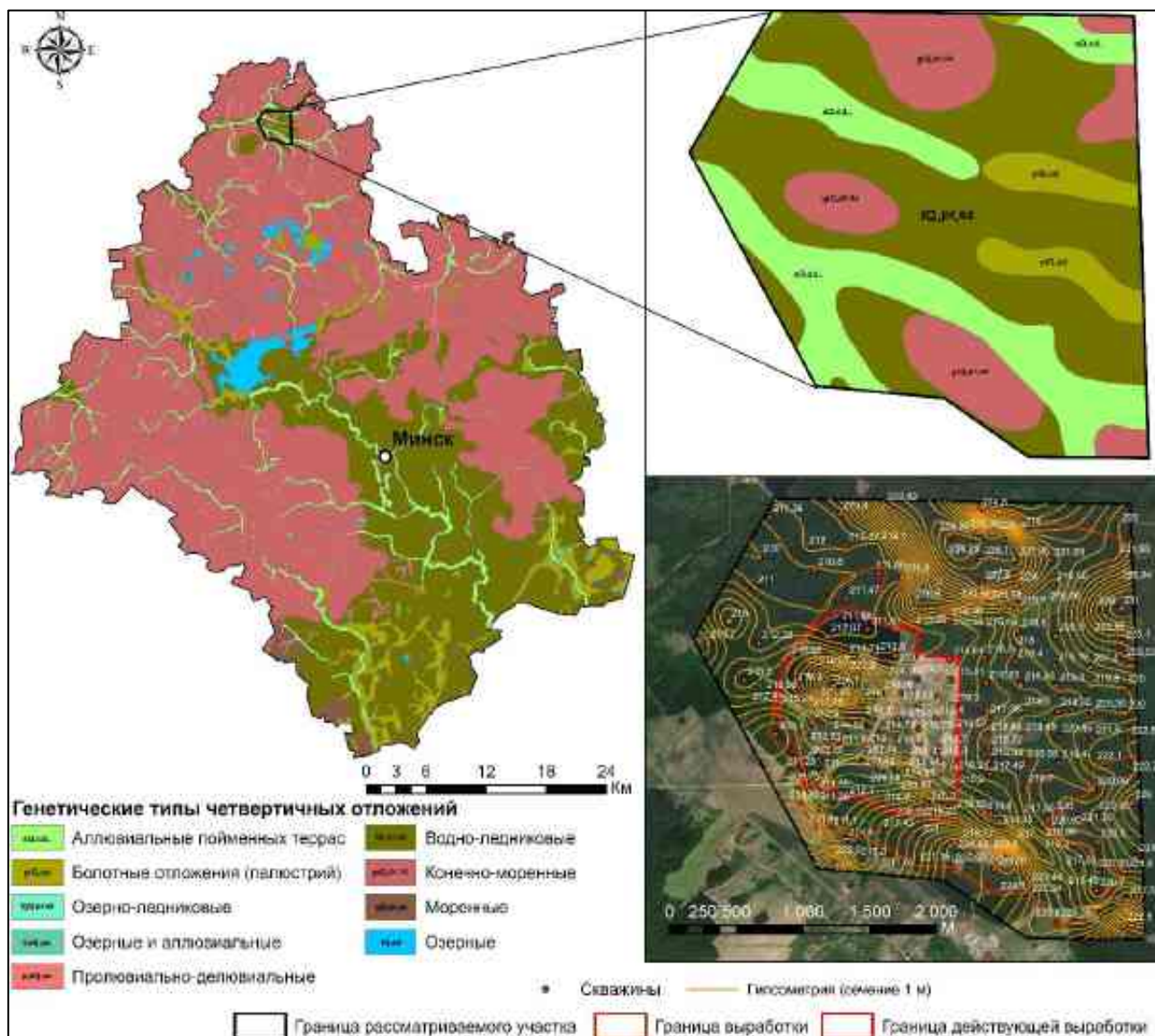


Рис. 1. Обзорная картосхема месторождения «Гайдуковка»
(генетические индексы приведены в соответствии с местной классификацией)

Fig. 1. Overview map of the Gaidukovka deposit
(the genetic indexes are given in accordance with the local classification)

Моренные отложения на месторождении на полную мощность не пройдены бурением, вскрытая мощность их достигает 26 м. Представлены моренные образования коричневато-бурыми, желто-бурыми грубыми супесями и в единичных случаях гравелистыми песками. Абсолютные отметки подошвы озерно-ледниковых отложений колеблются от 185,6 м в западной части месторождения до 248,6 м – в восточной. Абсолютные отметки кровли от 202,2 м до 230 м на западе и от 220 до 265 м на востоке месторождения. Мощность их колеблется от десятков сантиметров в краевых частях до 32,5 м в центральной части месторождения. Представлены озерно-ледниковые отложения ленточными глинами, реже суглинками и супесями, алевроитами и тонкими песками. Мощность слоев в ленточных глинах колеблется от 1,2 мм до 20 мм, в среднем составляет 2–5 мм. Средняя мощность глинистой толщи 10–12 м.

По данным опытного подсчета лент в полезной толще [17] длительность осадконакопления можно оценить примерно в 6–8 тыс. лет. Полезное ископаемое залегает пластообразно, выклиниваясь в краевых частях месторождения, толща имеет в плане овальную форму, вытянута в субширотном направлении и имеет размеры до 5 км в длину, до 3 км в ширину, площадь около 8 км².

Для подсчета запасов были использованы топографические планы [18], пространственно привязанные к территории исследований. Для занесения атрибутов, соответствующих каждой скважине, использовались данные бурения [19], коротко отраженные в табл. 1. Моделирование проводили в программном продукте ArcGIS Pro с использованием модуля 3D Analyst.

Таблица 1. Пример сокращенного варианта описания разреза скважины

Table 1. An example of an abbreviated version of the description of a well section

№ п/п	Наименование и номер выработки	Абсолютная отметка устья, м	Глубина, м	Геологический индекс	Краткое описание пород	Глубина залегания, м		Мощность, м
						от	до	
1.	Скв. 912	212,41	15,0	Q _{4sd}	1.Растительный слой	0,0	0,2	0,2
				laQ _{3pz4}	2. Песок серовато-желтый, мелкозернистый	0,2	1,4	1,2
				lgQ _{2pr2sž}	3. Глина темно-коричневая, жирная	1,4	6,5	5,1
				gQ _{2pr2sž}	4. Супесь темно-коричневая, грубая	6,5	15,0	8,5

Всего было оцифровано 195 скважин с высотными значениями в диапазоне от 201,2 до 231,0 м. Помимо точечных объектов, в виде линейных элементов была нанесена граница горного отвода участка, согласно проектной документации. В ранее созданную базу данных были внесены сведения о мощности каждого стратиграфического слоя в пределах скважин. На основании этих данных выполнено построение поверхностей кровли и подошвы глинистого пласта, а также модели поверхности забоя скважин. Кроме того, созданные поверхности были преобразованы в формат нерегулярной треугольной сети (TIN), что позволило с использованием инструмента «Разность поверхностей» определить объем толщ, заключенных между слоями. Схожий метод триангуляционной сети показал свою эффективность в подсчете запасов верхнемиоценовой глины в Ираке, показавший хорошие результаты моделирования [20].

Следует также отметить, что данный инструмент предназначен для геометрического сравнения треугольных элементов двух исходных поверхностей. В процессе анализа треугольники первой поверхности классифицируются в зависимости от их положения относительно второй (базовой) поверхности – как полностью расположенные выше, ниже либо пересекающие ее. В случае пересечения исходные треугольники делятся на отдельные фрагменты, которые далее также распределяются по следующим категориям: выше, ниже или совпадающие (копланарные) с базовой поверхностью. Однородные по классификации фрагменты и соседние треугольники объединяются в полигоны, для которых рассчитываются объемные параметры. Суммирование этих значений позволяет получить итоговые объемы по каждому полигону, а результаты вычислений сохраняются в виде полигонального слоя пространственных объектов [21].

Результаты и их обсуждение. На основании сформированной базы данных точек буровых скважин построены GRID-модели поверхностей, отражающие рельеф территории по состоянию на 1967 г. до начала разработки месторождения, а также пространственное положение кровли и подошвы глинистого пласта. Интерполяция исходных данных выполнена с учетом пространственного распределения скважин и морфологических особенностей рельефа. Полученные растровые модели были впоследствии преобразованы в формат нерегулярной треугольной сети (TIN), что позволило более точно аппроксимировать сложные формы геологических границ, минимизировать сглаживание локальных аномалий и обеспечить корректность дальнейших объемных расчетов (рис. 2).

Анализ построенной трехмерной модели показал, что кровля пласта ленточных глин характеризуется выраженной волнистой морфологией, обусловленной сочетанием первичных условий осадконакопления в озерно-ледниковой обстановке и деятельностью последующих экзогенных процессов. Абсолютные отметки кровли изменяются в пределах от 201,2 до 224,6 м, при этом наибольшие значения приурочены преимущественно к восточной, северо-восточной и южной частям исследуемого участка. Такая закономерность отражает как общее погружение поверхности в центральной части ледниковой котловины, так и влияние рельефа поверхности подстилающих моренных отложений.

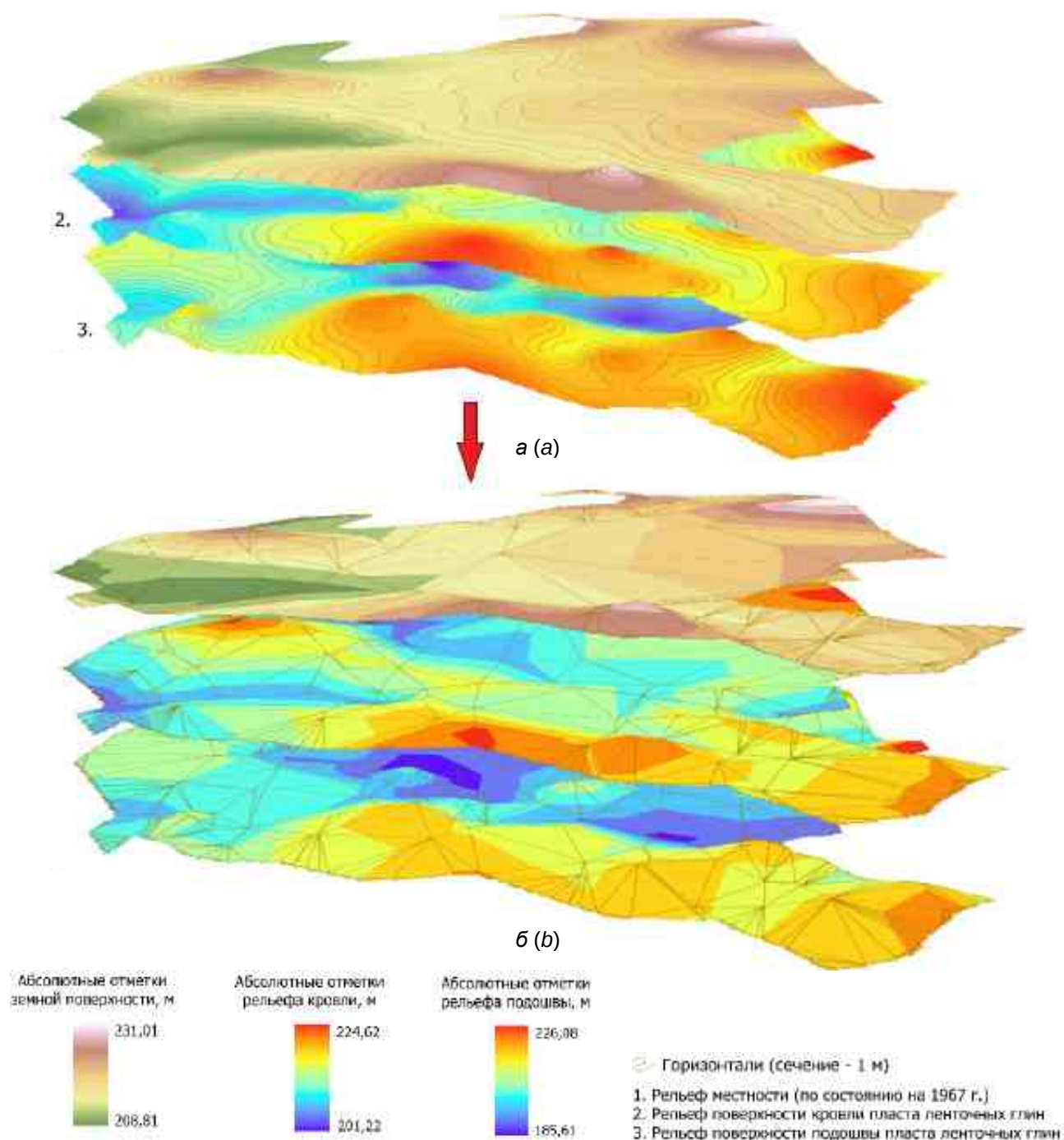


Рис. 2. Построенные 3D-поверхности: а – GRID-модель; б – TIN-модель

Fig. 2. Constructed 3D surfaces: a – GRID model; b – TIN model

Подошва пласта ленточных глин характеризуется более сглаженной и устойчивой формой по сравнению с кровлей и залегает непосредственно на моренных отложениях сожского подгоризонта припятского горизонта. Пространственное положение подошвы и характер ее поверхности подтверждают генетическую связь глинистой толщи с озерно-ледниковыми условиями осадконакопления, при которых формирование ленточных глин происходило в относительно спокойной гидродинамической обстановке на дне ледниковой котловины. Отсутствие резких перепадов отметок подошвы свидетельствует о стабильности базиса осадконакопления на этапе формирования продуктивной толщи.

Построенная модель мощности пласта отражает преимущественно пластообразный характер залегания полезного ископаемого с закономерным увеличением мощности в центральной части месторождения и ее постепенным уменьшением к периферии, вплоть до полного выклинивания в краевых зонах.

Максимальные значения мощности глинистой толщи, достигающие 24,9 м, приурочены к центральной части ледниковой котловины, где создавались наиболее благоприятные условия для накопления тонко-дисперсного материала. Следует отметить, что данные участки в значительной степени уже отработаны, что подтверждается результатами ретроспективного анализа процесса разработки месторождения.

В периферийных зонах месторождения мощность ленточных глин уменьшается до нескольких метров и менее, что обусловлено как изменением литологических условий, так и влиянием неровностей рельефа подстилающей поверхности моренных отложений. Тем не менее анализ пространственного распределения мощности и морфологии пласта позволяет выделить северо-восточную часть участка как перспективную для дальнейшей разработки, где средняя мощность глинистой толщи составляет порядка 15–16 м при относительно благоприятном соотношении мощности полезного ископаемого и вскрышных пород.

В результате вычислений был получен суммарный геометрический объем глинистой толщи, а также объем вскрышных пород (табл. 2). Поверхность, сформированная на основе указанной разности, создается с использованием ограниченной триангуляции Делоне и геометрического сопоставления двух исходных поверхностей. Значения координаты z у данной разностной поверхности отражают высотное различие между этими поверхностями [21]. Полученное значение отражает объем полезного ископаемого без учета потерь и может рассматриваться как основа для дальнейших технико-экономических расчетов.

Таблица 2. Итог вычислений разности поверхностей

Table 2. The result of calculating the surface difference

Поверхность	Площадь полигона, км ²	Объем, м ³
Вскрышные породы	5,76	23 001 763,41
Глинистая толща		65 440 951,63

Суммарный геометрический объем глинистой толщи в пределах полигона горного отвода составляет 65,44 млн м³, тогда как объем вскрышных пород оценивается в 23,0 млн м³. Соотношение объемов полезного ископаемого и вскрыши свидетельствует о сравнительно благоприятных горно-геологических условиях разработки месторождения, характеризующихся значительной мощностью продуктивной толщи при относительно умеренных объемах вскрышных работ.

Важным преимуществом примененной методики является ее универсальность и масштабируемость, что позволяет рассматривать подсчет запасов не только в границах всего полигона горного отвода, но и в пределах отдельных локальных участков и блоков. Использование полигональных объектов в качестве масок анализа дает возможность выполнять объемные расчеты для произвольно выделенных зон, что особенно актуально при поэтапной разработке месторождений, проектировании очередности выемки полезного ископаемого и уточнении запасов в пределах эксплуатационных блоков.

Кроме того, предложенный подход может быть эффективно использован для оценки объемов уже выработанного полезного ископаемого. Путем сопоставления TIN-моделей рельефа до начала горных работ с актуальным фотоизображением месторождения (рис. 3) возможно определение объема извлеченной глинистой толщи и вскрышных пород за заданный временной интервал с последующим сравнением с отчетными материалами (табл. 3). Такой подход позволяет автоматизировать контроль фактической добычи, повысить точность учета извлеченных запасов и обеспечить сопоставимость проектных и фактических показателей разработки.

Суммарный объем извлеченного полезного ископаемого по всем рассмотренным участкам составляет 9,74 млн м³ при общем объеме вскрышных пород 2,24 млн м³, что в целом соответствует выявленным ранее закономерностям соотношения полезного ископаемого и вскрыши.

Анализ распределения объемов по отдельным полигонам показывает существенную неоднородность параметров выработки, что обусловлено как различиями в площади участков, так и изменчивостью мощности глинистого пласта. Наибольшие объемы извлеченной глинистой толщи приурочены к полигонам с максимальной площадью (участки № 1, 4, 9), что подтверждает корректность применения методики разностного анализа поверхностей для оценки фактической добычи. В то же время малые по площади полигоны характеризуются незначительными объемами извлеченных пород, что демонстрирует высокую чувствительность метода к масштабированию расчетной области. Сопоставление рассчитанных объемов с архивными данными о добыче полезного ископаемого за 1984–2001 гг. показывает принципиальную сопоставимость порядков величин, несмотря на различия в методиках подсчета и исходных данных.



Рис. 3. Отработанные полигоны, фрагмент аэрофотоснимка 2025 г.

Fig. 3. Spent landfills, fragment of an aerial photograph from 2025

Таблица 3. Сравнение извлеченных объемов горных масс

Table 3. Comparison of extracted volumes of rock masses

№ п/п	Площадь, м ²	Объем извлеченных вскрышных пород, м ³	Объем извлеченного полезного ископаемого, м ³	Отработано за 1984–2001 гг., тыс. м ³ (категории запасов А, В, С ₁ , С ₂) [17]
1.	111 000	217 108,36	575 756,62	8782,00
2.	40 800	19 001,04	290 689,31	
3.	43 000	42 008,24	621 622,61	
4.	404 000	1 029 931,68	5 087 569,43	
5.	4200	2754,12	7882,70	
6.	1300	144,02	1319,72	
7.	5800	3762,72	7222,38	
8.	900	93,58	656,45	
9.	192 200	929 286,53	3 150 172,45	
Всего	803 200	2 244 090,29	9 742 891,67	

Результаты трехмерного анализа также позволяют увязать пространственные особенности отработки месторождения с динамикой производственных показателей карьера в постпроектный период. После 2002 г. фактическая производительность карьера по добыче глинистого сырья характеризуется устойчивым снижением и в течение длительного времени не достигает проектного уровня 605 тыс. м³ в год [17]. Согласно расчетам, объем добытой глины с 2002 г. по настоящее время достигает порядка 961 тыс. м³ за более чем 23 года отработки месторождения. Данная тенденция обусловлена, с одной стороны, значительной выработанностью наиболее мощных и технологически благоприятных участков центральной части месторождения, а с другой – переходом к эксплуатации зон, отличающихся меньшей мощностью глинистой толщи и менее благоприятным соотношением полезного ископаемого и вскрышных пород; при этом, исходя из картограммы, построенной методами геостатистического трехмерного байесовского кригинга [22], наибольшая доля глинистого пласта с глубиной наблюдается именно в северо-восточной части участка, в рамках территории, на данный момент составляющей лесной массив (рис. 4). Следует отметить, что данный показатель отражает соотношение мощности пласта глины к глубине скважины, выраженный в процентах.

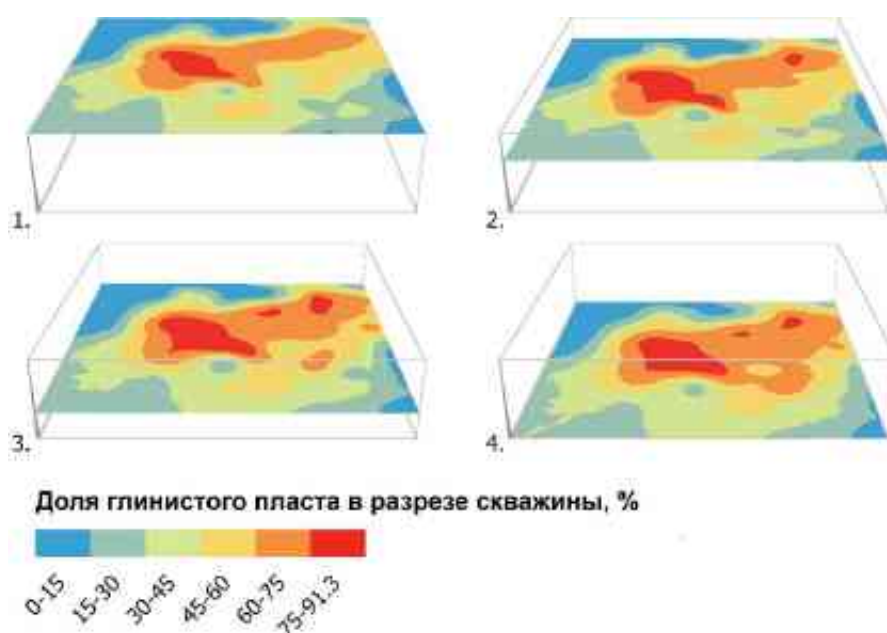


Рис. 4. Трехмерная геостатистическая модель карьера «Гайдуковка», отражающая долю мощности глинистого пласта в разрезе скважины на разных глубинах:
1 – 5,1 м; 2 – 14,3 м; 3 – 23,4 м; 4 – 32,5 м

Fig. 4. Three-dimensional geostatistical model of the Gaidukovka quarry, reflecting the proportion of clay formation in the section of the well at different depths:
1 – 5.1 m; 2 – 14.3 m; 3 – 23.4 m; 4 – 32.5 m

На основе анализа трехмерной геостатистической модели, установлено, что наиболее благоприятные условия для выработки полезного ископаемого приурочены к северо-восточной части территории месторождения. Вместе с тем сопоставление результатов моделирования с настоящей ситуацией ведения горных работ, отраженной на спутниковых снимках, показывает, что текущая разработка сосредоточена преимущественно вне данной зоны. Это свидетельствует о несоответствии направлений выработки объективным геостатистическим характеристикам продуктивной толщи, что может приводить к снижению эффективности добычи и росту удельных затрат. Полученные результаты подчеркивают необходимость корректировки планов разработки с учетом выявленных пространственных закономерностей распределения запасов. В условиях недостижения проектной производительности карьер «Гайдуковка» функционирует с пониженной загрузкой производственных мощностей, что в совокупности с ростом себестоимости добычи обуславливает его статус планово-убыточного подразделения ОАО «Керамин». В этом контексте результаты трехмерного ГИС-моделирования представляют практическую ценность как инструмент объективной оценки текущего состояния ресурсной базы и обоснования возможных сценариев оптимизации дальнейшей разработки месторождения.

Заключение. В ходе проведенного исследования рассмотрена возможность применения геоинформационных технологий для построения трехмерной цифровой модели месторождения ленточных глин и подсчета объемов полезного ископаемого и вскрышных пород на примере участка месторождения «Гайдуковка». Полученные результаты подтверждают целесообразность использования ГИС, в частности ArcGIS Pro, для решения задач моделирования геологического строения и предварительной оценки запасов неметаллических полезных ископаемых.

На основе архивных материалов бурения и топографических данных сформирована пространственно согласованная база геологических данных, выполнено построение поверхностей кровли и подошвы глинистого пласта, а также создана трехмерная модель продуктивной толщи с использованием TIN-представления. Применение метода разности поверхностей позволило определить суммарный геометрический объем глинистой толщи в пределах полигона горного отвода, который составил 65,44 млн м³, а также объем вскрышных пород – 23,0 млн м³. Соотношение указанных показателей свидетельствует о благоприятных горно-геологических условиях разработки месторождения.

Показано, что разработанный подход обеспечивает высокую наглядность интерпретации геологического строения, позволяет учитывать сложную морфологию границ пласта и является масштабируемым, что делает его применимым как для оценки запасов в целом по месторождению, так и для анализа отдельных эксплуатационных блоков. Дополнительно продемонстрирована возможность использования трехмерного ГИС-моделирования для ретроспективной оценки объемов фактически извлеченного полезного ископаемого и вскрышных пород, а также для контроля соответствия проектных и фактических показателей добычи.

Вместе с тем установлено, что точность получаемых результатов во многом определяется качеством и плотностью сети буровых скважин, а также выбранными методами интерполяции поверхностей. К ограничениям ArcGIS Pro следует отнести отсутствие специализированных инструментов геостатистической оценки неопределенности запасов, что характерно для профильных горно-геологических программных комплексов. Несмотря на это, универсальные ГИС-технологии могут эффективно применяться на стадиях детального изучения, оперативного уточнения геологической модели и предварительной оценки запасов.

Результаты настоящего исследования подтверждают перспективность использования ArcGIS Pro для построения цифровых моделей месторождений ленточных глин и решения прикладных задач недропользования. Предложенный методический подход может быть рекомендован для использования в проектно-изыскательских работах, при планировании разработки месторождений неметаллических полезных ископаемых, а также в учебных и научных целях как пример интеграции современных ГИС-технологий в практику геологии и горных наук.

Список использованных источников

1. Митюнина, И. Ю. Особенности технологии 3D-моделирования в горно-геологических информационных системах / И. Ю. Митюнина // Горно-геологические информационные системы / под ред. д-ра техн. наук, проф. В. И. Костицына. – Мн., 2018. – С. 217–222.
2. Sides, E. J. Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining / E. J. Sides // *Geologische Rundschau*. – 1997. – Т. 86, № 2. – С. 342–353.
3. Liu, Y. Developments in quantitative assessment and modeling of mineral resource potential : an overview / Y. Liu, E. J. M. Carranza, Q. Xia // *Natural Resources Research*. – 2022. – Т. 31, №. 4. – С. 1825–1840.
4. Применение геостатистического алгоритма коррекции данных ГИС при моделировании сложнопостроенных залежей углеводородов на этапе доразведки месторождения / В. Л. Шустер [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. – 2021. – Т. 63, №. 5. – С. 91–99.
5. Matheron, G. The intrinsic random functions and their applications / G. Matheron // *Advances in Applied Probability*. – 1973. – Vol. 5. – P. 439–468.
6. Matheron, G. The intrinsic random functions and their applications / G. Matheron. – Fontainebleau : Centre of Geostatistics, 1978. – 175 p.
7. Matheron, G. The theory of regionalized variables and its applications / G. Matheron. – Fontainebleau : Centre of Geostatistics, 1971. – 212 p.
8. Surpac – mine planning software. – URL: <https://www.surpac.co.za/> (date of access: 28.10.2025).
9. Рубцова, Е. В. О создании геоинформационных систем сопровождения подземных горных работ / Е. В. Рубцова // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2005. – Т. 2. – С. 106–113.
10. Mallet, J. L. GOCAD: A computer aided design program for geological applications / J. L. Mallet // *Three-dimensional modeling with geoscientific information systems*. – Dordrecht : Springer Netherlands, 1992. – P. 123–141.
11. Building 3D geological models directly from the data? A new approach applied to Broken Hill, Australia // *US Geological survey Open-file report*. – 2005. – Т. 1428. – С. 119–130.

12. Демьянов, В. В. Геостатистика: теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Савельева. – М. : Наука, 2010. – 327 с.
13. Scott, M. GIS: modern mineral potential modelling and quantitative resource assessment: implications for the Geological Survey of Queensland / M. Scott // Australian Institute of Geoscientists Journal. – 2000. – URL: <https://www.aig.org.au> (date of access: 29.10.2025).
14. Дранишников, П. С. Использование ГИС-технологий при подсчете запасов полезного ископаемого / П. С. Дранишников, Т. А. Кувашкина, Е. А. Конкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 4. – С. 171–173.
15. Калдыбаев, Н. А. Моделирование разработки малых месторождений нерудных полезных ископаемых с использованием геоинформационных технологий / Н. А. Калдыбаев, А. М. Абдыкадыров, Ж. Маматов // Наука. Образование. Техника. – 2016. – № 2. – С. 86–94.
16. Волянская В. В. Тестирование и верификация новых технологий в науках о Земле: методические рекомендации // Георесурсы. – 2021. – Т. 23, №. 2. – С. 192–196.
17. Проект постоянных кондиций для подсчета запасов глин на месторождении Гайдуковка ОАО «Керамин» Минского района Минской области с пересчетом запасов по состоянию на 01.01.2002 г. : пояснительная записка. – Мн. : Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, НИРУП «Силикат», 2003. – 333 с.
18. Отчет о результатах дополнительных геологоразведочных работ по переводу части запасов категории С₂ в промышленные категории на месторождении глин Гайдуковка Минского района и области БССР с подсчетом запасов на 01.01.1984 : графические приложения. – Мн. : Мин-во промышленности строительных материалов БССР, 1984. – 5 л.
19. Отчет о результатах дополнительных геологоразведочных работ по переводу части запасов категории С₂ в промышленные категории на месторождении глин Гайдуковка Минского района и области БССР с подсчетом запасов на 01.01.1984 : текстовые приложения. – Мн. : Мин-во промышленности строительных материалов БССР, 1984. – 210 с.
20. Awad, A. M. Reserve estimation of Late Miocene Injana claystone beds for portland cement and brick industry, Middle of Iraq / A. M. Awad, S. M. Awadh // The Iraqi Geological Journal. – 2020. – С. 1–16.
21. Surface Difference (3D Analyst). – URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/surface-difference.htm> (date of access: 26.10.2025).
22. Киндеев, А. Л. Трехмерное геостатистическое моделирование запасов глин на примере карьера «Гайдуковка» / А. Л. Киндеев, А. А. Якушев // ГИС-технологии в науках о Земле. – 2025. – С. 279–283.

References

1. Mityunina I. Yu. *Osobennosti tekhnologii 3D-modelirovaniya v gorno-geologicheskikh informatsionnykh sistemakh* [Features of 3D modeling technology in mining and geological information systems]. *Gorno-geologicheskie informatsionnye sistemy* [Mining and Geological Information Systems]. Kostitsyn V. I. (ed.). Minsk, 2018, pp. 217–222. (in Russian)
2. Sides E. J. Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. *Geologische Rundschau*, 1997, vol. 86, no. 2, pp. 342–353.
3. Liu Y., Carranza E. J. M., Xia Q. Developments in quantitative assessment and modeling of mineral resource potential: an overview. *Natural Resources Research*, 2022, vol. 31, no. 4, pp. 1825–1840.
4. Shuster V. L. et al. *Primenenie geostatisticheskogo algoritma korrektsii dannykh GIS pri modelirovanii slozhnopostroyennykh zalezhei uglevodorodov na etape dorazvedki mestorozhdeniya* [Application of a geostatistical algorithm for well log data correction in modeling complex hydrocarbon reservoirs at the stage of additional exploration]. *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka = Proceedings of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration*, 2021, vol. 63, no. 5, pp. 91–99. (in Russian)
5. Matheron G. The intrinsic random functions and their applications. *Advances in Applied Probability*, 1973, vol. 5, pp. 439–468.
6. Matheron G. The intrinsic random functions and their applications. *Fontainebleau : Centre of Geostatistics*, 1978, 175 p.
7. Matheron G. The theory of regionalized variables and its applications. *Fontainebleau : Centre of Geostatistics*, 1971, 212 p.
8. Surpac – mine planning software. – URL: <https://www.surpac.co.za/> (accessed October 28, 2025).
9. Rubtsova E. V. *O sozdaniy geoinformatsionnykh sistem soprovozhdeniya podzemnykh gornykh rabot* [On the development of geoinformation systems for underground mining support]. *Interekspos Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*, 2005, vol. 2, pp. 106–113. (in Russian)
10. Mallet J. L. GOCAD: A computer aided design program for geological applications. *Three-dimensional modeling with geoscientific information systems*. Dordrecht, Springer Netherlands Publ., 1992, pp. 123–141.
11. McInerney P. et al. Building 3D geological models directly from the data? A new approach applied to Broken Hill, Australia. *U. S. Geological Survey Open-File Report*, 2005, no. 1428, pp. 119–130.
12. Demyanov V. V., Savel'eva E. A. *Geostatistika: teoriya i praktika* [Geostatistics: theory and practice], Moscow, Nauka Publ., 2010, 327 p. (in Russian)
13. Scott M. GIS: modern mineral potential modelling and quantitative resource assessment: implications for the Geological Survey of Queensland. *Australian Institute of Geoscientists Journal*, 2000. URL: <https://www.aig.org.au> (accessed October 29, 2025).

14. Dranishnikov P. S., Kuvashkina T. A., Konkin E. A. *Ispol'zovanie GIS-tekhnologii pri podschyote zapasov poleznogo iskopaemogo* [Application of GIS technologies in mineral reserve estimation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'* = *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2004, no. 4, pp. 171–173. (in Russian)
15. Kaldybaev N. A., Abdykadyrov A. M., Mamatov Zh. *Modelirovanie razrabotki malykh mestorozhdenii nerudnykh poleznykh iskopaemykh s ispol'zovaniem geoinformatsionnykh tekhnologii* [Modeling of small non-metallic mineral deposits development using geoinformation technologies]. *Nauka. Obrazovanie. Tekhnika* = *Science. Education. Technic*, 2016, no. 2, pp. 86–94. (in Russian)
16. Volyanskaya V. V. *Testirovanie i verifikatsiya novykh tekhnologii v naukakh o Zemle: metodicheskie rekomendatsii* [Testing and verification of new technologies in Earth sciences: methodological guidelines]. *Georesursy* = *Geo resources*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 192–196, DOI: 10.18599/grs.2021.2.19 (in Russian)
17. *Proekt postoyannykh konditsii dlya podschyota zasobov glin na mestorozhdenii Gaidukovka OAO "Keramin" Minskogo raiona Minskoi oblasti s pereschyotom zasobov po sostoyaniyu na 01.01.2002 g.: poyasnitel'naya zapiska* [Project of permanent conditions for calculating clay reserves at the Gaidukovka deposit of OJSC "Keramin" in Minsk District, Minsk Region, with reserve recalculation as of 01.01.2002: explanatory note]. Minsk, Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus' Publ., NIRUP "Silikat" Publ., 2003, 333 p. (in Russian)
18. *Otchet o rezul'tatakh dopolnitel'nykh geologorazvedochnykh rabot po perevodu chasti zasobov kategorii C₂ v promyshlennyye kategorii na mestorozhdenii glin Gaidukovka Minskogo raiona i oblasti BSSR s podschyotom zasobov na 01.01.1984 g.: graficheskie prilozheniya* [Report on additional geological exploration works for transferring part of category C₂ reserves to industrial categories at the Gaidukovka clay deposit, with reserve calculation as of 01.01.1984: graphic appendices]. Minsk, Ministerstvo promyshlennosti stroitel'nykh materialov BSSR Publ., 1984, 5 sheets. (in Russian)
19. *Otchet o rezul'tatakh dopolnitel'nykh geologorazvedochnykh rabot po perevodu chasti zasobov kategorii C₂ v promyshlennyye kategorii na mestorozhdenii glin Gaidukovka Minskogo raiona i oblasti BSSR s podschyotom zasobov na 01.01.1984 g.: tekstovyye prilozheniya* [Report on additional geological exploration works for transferring part of category C₂ reserves to industrial categories at the Gaidukovka clay deposit, with reserve calculation as of 01.01.1984: text appendices]. Minsk, Ministerstvo promyshlennosti stroitel'nykh materialov BSSR Publ., 1984, 210 p. (in Russian)
20. Awad A. M., Awadh S. M. Reserve estimation of Late Miocene Injana claystone beds for portland cement and brick industry, Middle of Iraq. *The Iraqi Geological Journal*, 2020, pp. 1–16.
21. Surface Difference (3D Analyst). URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/surface-difference.htm> (accessed October 26, 2025).
22. Yakushev A. A., Kindeev A. L. *Tryokhmernoe geostatisticheskoe modelirovanie zasobov glin na primere kar'era "Gaidukovka"* [Three-dimensional geostatistical modeling of clay reserves on the example of the "Gaidukovka" quarry]. *GIS-tekhnologii v naukakh o Zemle*, 2025, pp. 279–283. (in Russian)

Информация об авторах

Якушев Андрей Александрович – студент 4 курса, Белорусский государственный университет, (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: andryusha.yakushev.2004@gmail.com

Киндеев Аркадий Леонидович – кандидат географических наук, старший преподаватель, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: klarkhun@gmail.com

Information about the authors

Andrey A. Yakushev – 4th year student, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: andryusha.yakushev.2004@gmail.com

Arkady L. Kindeev – Ph. D. (Geography), Senior lecturer, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: klarkhun@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-204-221>
УДК 556.3(476.6)

Поступила в редакцию 13.05.2026
Received 13.05.2026

ГЕОМИГРАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РАДИОНУКЛИДАМИ В МЕЖДУРЕЧЬЕ ВИЛИЯ – ГОЗОВКА (РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ)

В. Г. Жогло

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Объектом исследования являются подземные воды зон активного и замедленного водообмена в междуречье Вилия – Гозовка. Цель исследования – прогноз возможного загрязнения подземных вод в случае утечек радиоактивных отходов Белорусской атомной электростанции (БелАЭС) из места их захоронения. Метод исследований – численное моделирование фильтрации и миграции подземных вод.

Для геомиграционного моделирования потенциального загрязнения подземных вод в междуречье Вилия – Гозовка создана и откалибрована трансграничная численная модель фильтрации и миграции подземных вод на территории, ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка. На модели воспроизведены грунтовый, днепровский-сожский, березинский-днепровский, бриневский и силурийский-девонский водоносные горизонты. В центре моделируемой области расположен ядерно-энергетический комплекс БелАЭС. Численная модель объекта реализована на базе программного обеспечения ModTech ЗАО «Геолинк» (г. Москва).

На созданной модели выполнено моделирование миграции радионуклидов в водонасыщенных горных породах и дана количественная оценка потенциального влияния источника загрязнения на качество подземных вод. По результатам геомиграционного моделирования составлены прогнозные карты активности радионуклидов в подземных водах грунтового водоносного горизонта на 20, 50, 100 и 200 лет, а на 300-летний период – для подземных вод грунтового, днепровского-сожского, березинского-днепровского и бриневского водоносных горизонтов.

Миграция радионуклидов вдоль напластования горных пород протекает крайне медленно. Максимальная скорость миграции не превышает 15,0–17,0 м/год. В течение 300 лет очаг загрязнения грунтовых вод не выходит за пределы моделируемого водосбора.

Ключевые слова: Островец; БелАЭС; РАО; ПЗРО; радионуклиды; подземные воды; инфильтрационное питание; радиоактивные отходы; схематизация; численное моделирование; геофильтрация; геомиграция; потенциальное загрязнение.

Для цитирования. Жогло В. Г. Геомиграционное моделирование потенциального загрязнения подземных вод радионуклидами в междуречье Вилия – Гозовка (Республика Беларусь) // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 204–221.

GEOMIGRATION MODELING OF POTENTIAL GROUNDWATER CONTAMINATION BY RADIONUCLIDES IN THE VILIYA – GOZOVKA INTERFLUVE (REPUBLIC OF BELARUS)

V. G. Zhoglo

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The object of the study is the underground waters zones of active and slow water exchange in the interfluence of Viliya Gozovka. The aim of the study is to forecast possible contamination of groundwater in case of leaks of radioactive waste (from the Belarusian nuclear power plant (BelNPP) from the place of their burial. Research method – numerical modeling of filtering and migration of underground waters.

For the geomigration modeling of potential groundwater pollution in the inter-Viliya-Gozovka region, a cross-border numerical model of filtration and migration of groundwater on the territory limited by the rivers Viliya, Oshmyanka, Losha and Gozovka has been created and calibrated. The model depicts the ground, Dnipro-Soga, Berezina-Dnipro, Brynev and Silurian-Devonian aquifers. In the center of the modelled area is located the nuclear energy complex BelNPP. The numerical model of the object is implemented on the basis of the software ModTech CJSC “Geolink” (Moscow).

In the created model, the migration of radionuclides into water-bearing rocks was modeled and a quantitative assessment of the potential influence of the source of pollution on groundwater quality was made. Based on the results of geomigration modeling, projected maps of radionuclide activity in groundwater of the groundwater aquifer for 20, 50, 100 and 200 years, and for 300-year period – for groundwater of the groundwater, Dnieper-Sochi, Berezini-Dnieper and Brynev aquifers.

The migration of radionuclides along rock plating is extremely slow. The maximum migration rate does not exceed 15.0–17.0 m/year. For 300 years, the source of groundwater pollution has not moved beyond the modelled catchment area.

Keywords: insulator; BeINPP; radioactive waste; radioactive waste disposal facility; radionuclides; groundwater; infiltration nutrition; radioactive waste; schematization; numerical modeling; geofiltration; geomigration; potential pollution.

For citation. Zhoglo V. G. Geomigration modeling of potential groundwater contamination by radionuclides in the Viliya – Gozovka interfluvium (Republic of Belarus). *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 204–221.

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь активно изучаются перспективы расширения своей атомной энергетики за счёт строительства второй атомной электростанции (АЭС) или третьего энергоблока на действующей БелАЭС [1, 2]. Основные проблемы развития связаны с обращением с РАО и высокой стоимостью вывода из эксплуатации ядерных объектов [3, 4].

Источниками радиоактивных отходов в Республике Беларусь являются БеАЭС, объекты ликвидации последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС), а также медицинские, научные и промышленные учреждения, использующие источники ионизирующего излучения (ИИИ). Твердые и жидкие РАО БелАЭС включают отработанное ядерное топливо (ОЯТ), которое временно хранится на станции, а также эксплуатационные отходы (фильтры, спецодежда, инструменты). Наследием Чернобыльской аварии являются пункты захоронения отходов дезактивации (ПЗОД), образовавшиеся после аварии на ЧАЭС (срезание грунта, снос зданий), преимущественно в Гомельской и Могилёвской областях. К историческому наследию относится хранилище РАО бывших военных объектов в Речицком районе Гомельской области (пункт «Гомель-30»). Источником РАО являются побочные продукты работы приборов, используемых в медицине (облучатели, радиофармпрепараты для диагностики и лечения, хроматографы), авиации (радиоизотопные датчики обледенения), промышленности (уровнемеры, дефектоскопы), науке (ускорители, радиохимические лаборатории), армии и гражданской обороне (дымоизвещатели, содержащие источники альфа-излучения – изотопы плутония), при поисках и разведке полезных ископаемых (толщиномеры, плотномеры). С течением времени эти приборы приходят в негодность, а отработанные РАО необходимо хранить. Первый полигон с хранилищами для радиоактивных отходов был построен в поселке Сосны под Минском в 1963 г. Полный комплекс работ по долговременному хранению и захоронению радиоактивных отходов в Республике Беларусь выполняет коммунальное унитарное предприятие (УП) «Экорес», в составе которого имеется специализированное предприятие по обращению с РАО. Планируется создание республиканского пункта захоронения РАО для централизованного сбора и изоляции отходов [4–6].

Изобилие источников радиоактивных веществ на территории Республики Беларусь обуславливают высокую актуальность задач по оценке долговременной безопасности приповерхностных пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) и долгосрочному прогнозу потенциального загрязнения подземных вод радионуклидами. Общепринятой во всем мире методологией оценок долговременной безопасности приповерхностных ПЗРО является методология МАГАТЭ ISAM (Improvement of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities). Вероятностная оценка долговременной безопасности приповерхностного ПЗРО, выполненная [7], показала, что при имеющем место необратимом характере процессов деградации, приводящих к снижению прочностных, фильтрационных и сорбционных свойств инженерных барьеров, временные закономерности их разрушения весьма условны, а, следовательно, выводы относительно приемлемой безопасности ПЗРО не всегда достаточно обоснованы [7, 8].

В работе [7] представлена интегральная вероятностная модель системы захоронения РАО и выполнены расчеты вероятностей отказов для различных сценариев эволюции системы. Проведенный анализ показал, что на временном интервале свыше 50 лет после закрытия объекта наибольший вклад в вероятность отказа системы ПЗРО вносят сценарии, связанные с отказом инженерных конструкций хранилища РАО. Согласно оценкам ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси, на конкурирующих площадках для размещения ПЗРО БелАЭС зона аэрации не может исключить возможность поступления радионуклидов в ГВ в опасных концентрациях при разрушении инженерных барьеров. Расчеты показали, что уровня грунтовых вод (УГВ) могут достичь 15 из 36 радионуклидов, рассмотренных в предварительном составе РАО. Причем наиболее опасными из них являются радионуклиды, слабо сорбируемые грунтами зоны аэрации и грунтового водоносного горизонта (^3H , ^{133}Ba , ^{14}C , ^{239}Pu , ^{36}Cl , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{234}U), т. е. имеют значения сорбционных характеристик в грунтах (K_d), близкие к нулю [7, 8].

В целом мировой опыт свидетельствует о том, что эксплуатация атомных электростанций оказывает негативное влияние на радиационное состояние подземных вод. В качестве одного из последних примеров является АЭС «Фукусима» в Японии, где радиоактивное загрязнение грунтовых вод приобрело большие масштабы и рассматривается в качестве одного из серьезнейших последствий произошедшей аварии. Достигнув уровня грунтовых вод, радионуклиды будут переноситься потоком

подземных вод к областям их разгрузки (реки, озера, родники) и к источникам хозяйственно-питьевого водоснабжения (водозаборы подземных вод, трубчатые колодцы). В связи с этим уже на стадии выбора мест размещения ПЗРО необходим долговременный прогноз миграции радионуклидов в подземных водах.

Случаи загрязнения подземных вод неоднократно фиксировались также на станциях, работавших в штатном режиме, в России, США и других странах. Согласно работе [1] существует объективная необходимость создания пункта захоронения радиоактивных отходов для обеспечения безопасной изоляции эксплуатационных радиоактивных отходов БелАЭС разных категорий. Строительство ПЗРО целесообразно выполнить на основе приповерхностного способа локализации.

Миграция загрязнений в ПВ протекает крайне медленно, поэтому краткосрочные прогнозы по оценке влияния источников загрязнения на качественное состояние ПВ являются малоинформативными. Низкую эффективность имеют и результаты натурных наблюдений из-за малых скоростей миграции и сложной пространственной структуры фильтрационного потока. В связи с этим гораздо больший интерес представляют долгосрочные (на десятки и сотни лет) прогнозные оценки влияния водорастворимых загрязняющих веществ на качество подземных вод.

Повышенная сложность процессов миграции, их медленное развитие во времени обусловили широкое использование в практике гидрогеомиграционных исследований методов математического моделирования при решении геофильтрационных и геомиграционных задач. «Возможность их широкого применения стимулируется наличием мощных вычислительных средств, развитостью математического обеспечения численных расчетов» [9, с. 3]. Данное заключение не потеряло своей актуальности до настоящего времени. Еще в 1980-е годы В. А. МIRONENKO, Е. В. МОЛЬСКИЙ и В. Г. РУМЫНИН констатировали [10, с. 70], что «оценка текущей ситуации и долговременный прогноз качества ПВ требуют достаточно ясных представлений о процессе миграции загрязнений в условиях конкретного объекта и о возможных теоретических моделях, описывающих этот процесс: опыт показывает, что в противном случае допускаются серьезные просчеты даже в качественном понимании тенденций загрязнения ПВ, а следовательно, и в принципиальных схемах водоохраных мероприятий. Отражение всей совокупности влияющих факторов в единой расчетной модели является обычно задачей исключительной трудности. К тому же всегда существует неопределенность исходных представлений о процессе, а также дефицит необходимой для его всестороннего описания исходной информации. Все это вынуждает ориентироваться на заведомо упрощенные математические схемы и делает необходимыми многовариантные разведочные оценки». На открытии IV Международной научно-практической конференции «Новые методы и технологии в водоснабжении и водоотведении» 2 апреля 2026 г. Председатель Президиума НАН Беларуси В. С. Караник отметил, что чистая вода – это не только бесценный дар природы, но и стратегический ресурс государства; перед государством и обществом стоит нетривиальная задача: с одной стороны, обеспечить полную доступность этого ценного ресурса, а с другой стороны – ее сохранность для будущих поколений [11].

Объект исследований – подземные воды зон активного и замедленного водообмена на территории междуречья Вилия – Ошмянка – Лоша – Гозовка. Характеристика геологического строения и гидрогеологических условий объекта дана в работе [12]. Настоящая статья представляет собой продолжение публикации [12].

Цель работы – смоделировать потенциальное загрязнение подземных вод радионуклидами в междуречье Вилия – Ошмянка – Лоша – Гозовка (междуречье «ВОЛГ»).

Основные задачи: 1) создать численную модель фильтрации и миграции подземных вод (ЧМФиМПВ) на территории, ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка; 2) смоделировать миграцию радионуклидов в подземных водах; 3) дать оценку потенциального влияния источника загрязнения на качество подземных вод.

Из работы [12] взяты лишь те материалы и результаты исследований, которые необходимы для однозначного понимания и толкования решаемых задач в данной статье.

Материалы и методы исследования. Информационной основой ЧМФиМПВ междуречья «ВОЛГ» являются материалы по геолого-гидрогеологическим условиям Островецкого региона, полученные в процессе научного сопровождения работ по обоснованию строительства БелАЭС. Их подробная характеристика дана в работах [12, 13].

Базовые геолого-гидрогеологические материалы накапливались в процессе выполнения государственных геологических съемок, научно-исследовательских работ ГП «НПЦ по геологии», ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси» по проблемам неогеодинимики и региональной гидрогеологии Беларуси (А. К. Карабанов, А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич и др.), а также разработок по проблеме «Подземные воды» к обоснованию воздействия БелАЭС на окружающую среду (А. В. Кудельский, Н. М. Томина, В. И. Пашкевич и др.).

Специальные гидрогеологические исследования выполнены в 2008–2009 гг. УП «Геосервис» (П. С. Лисовский, А. В. Петух, А. А. Чекан и др.), в результате которых была получена ценная информация по подземным водам на территории пятикилометровой зоны БелАЭС.

В качестве исходной геофильтрационной основы для ЧМФиМПВ междуречья «ВОЛГ» использована численная геофильтрационная модель (ЧГФМ) данного объекта. Детальная характеристика ЧГФМ междуречья Вилия – Ошмянка – Лоша – Гозовка, методика ее создания и результаты решения задач по количественной оценке условий формирования инфильтрационного водообмена и естественных ресурсов ПВ приведены в статье [12].

ЧГФМ и ЧМФиМПВ междуречья «ВОЛГ» созданы на базе лицензионного программного обеспечения (ПО) «ModTech» ЗАО «Геолинк Консалтинг»: ЧГФМ – на основе вычислительной программы (ВП) GWFS, (разработчик – А. А. Рошаль, г. Москва), ЧМФиМПВ – на основе ВП GWFS и MTS (Mass Transport Simulation – Моделирование массопереноса в подземных водах (разработчик – А. М. Свищев, ЗАО «Геолинк»)) [14]. Система управления качеством разработки ПО «Геолинк» в 2002 г. сертифицирована на соответствие требованиям международного стандарта ISO 9001:2000. Программа MTS предназначена для моделирования переноса в воде химического компонента и расчета распределения концентрации в пространстве и времени. Моделирование задач массопереноса в ПВ осуществляется на основе численного решения классического уравнения конвективной диффузии. Решение осуществляется методом характеристик, теория которого изложена в работах [14–16] и др.

Создание численной модели фильтрации и миграции подземных вод на территории междуречья «ВОЛГ». При разработке численной модели фильтрации и миграции подземных вод, ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка (рабочее название модели – «Bel-PZROm»), мы ориентировались на рекомендации авторов книги [10, с. 72–75]. Использованы также работы [17–23].

Объектом исследования являются подземные воды территории, в плане ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка, сверху – уровнем поверхности грунтовых вод, снизу – плотными водоупорными породами кристаллического фундамента. Практически в центре объекта расположен ядерно-энергетический комплекс БелАЭС (рис. 1).

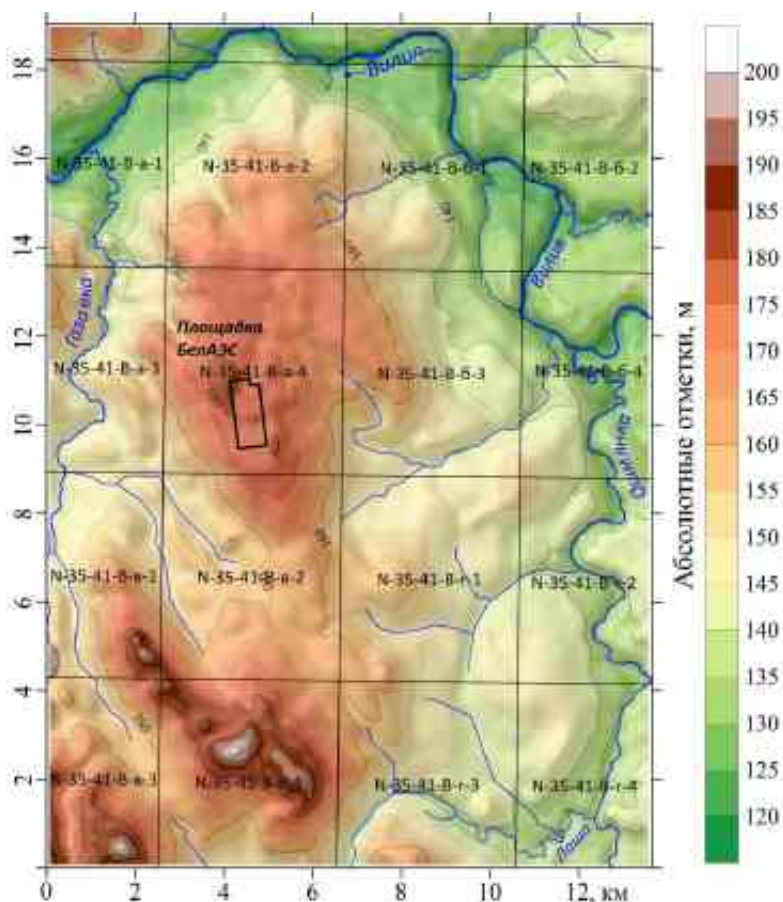


Рис. 1. Цифровая карта рельефа и гидрографической сети района БелАЭС (составил Ю. Ю. Трифонов)

Fig. 1. Digital map of the relief and hydrographic network of the BelNPP area (compiled by Yu. Yu. Trifonov)

При схематизации природных условий в районе БелАЭС и площадки для размещения ПЗРО нами сохранена структура и содержание геофильтрационной модели, созданной в УП «БелНИГРИ» (в настоящее время филиал «Институт геологии» ГП «НПЦ по геологии») с целью оценки эксплуатационных запасов подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения БелАЭС (руководитель работы – А. А. Чекан, создатель модели – Б. И. Коробейников). В вертикальном разрезе исследуемого объекта создателями модели выделено пять водоносных горизонтов (пластов) и четыре разделяющих слабопроницаемых слоя (РС). Расчетная схема в разрезе представлена на рис. 2.

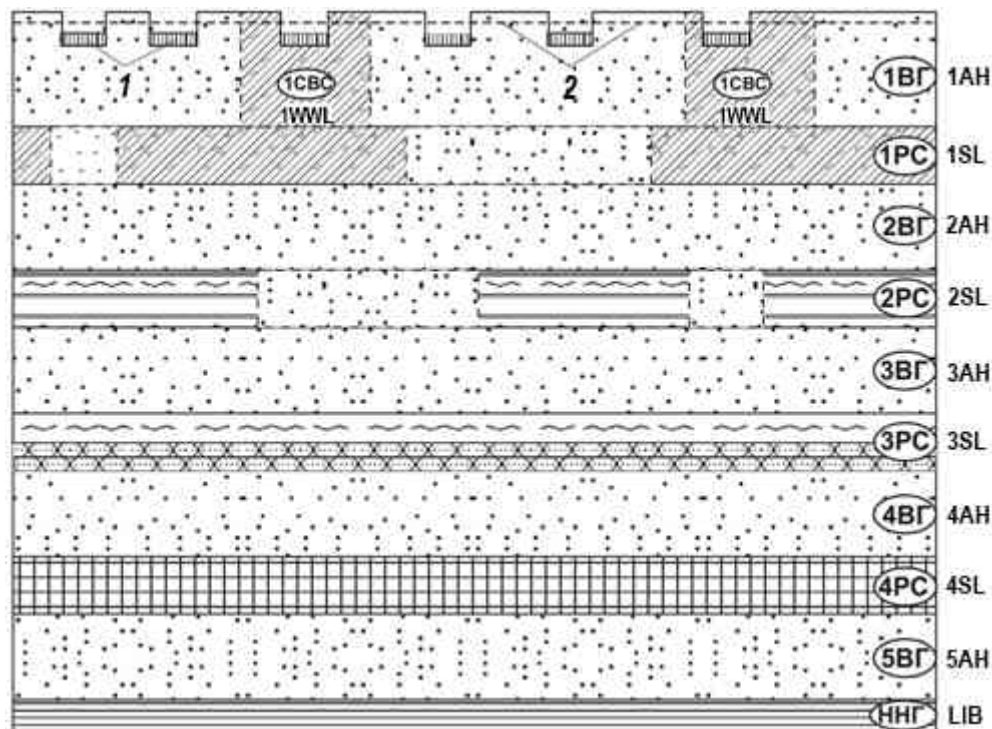


Рис. 2. Расчетная фильтрационная схема междуречья «ВОЛГ» в разрезе (на основе материалов УП «БелНИГРИ» и УП «Геосервис»):

1 – слабопроницаемые подрусловые отложения; 2 – уровенная поверхность грунтовых вод.

Водоносные горизонты (пласты):

- 1CBC – слабоводоносный слой (сожская морена в местах ее выхода на дневную поверхность);
 1BG – грунтовый ВГ, приуроченный к современным аллювиальным, болотным, водно-ледниковым и моренным отложениям поозерского оледенения; 2BG – днепровский-сожский водно-ледниковый горизонт; 3BG – березинский-днепровский водно-ледниковый горизонт;
 4BG – бриневский терригенный горизонт; 5BG – объединенный силурийский-девонский комплекс.

Разделяющие слабопроницаемые слои:

- 1PC – моренные отложения сожского оледенения; 2PC – моренные отложения днепровского оледенения;
 3PC – моренные отложения березинского оледенения и глины нижнего неогена;
 4PC – отложения верхнего девона и нижнего неогена; ННГ – нижняя непроницаемая граница (породы кристаллического фундамента)

Fig. 2. Calculated filtration scheme of the VOLGA interfluvium in the section (based on the materials of the UE "BelNIGRI" and UE "Geoservice"):

1 – Weakly permeable subsurface deposits; 2 – Level groundwater surface.

Aquiferous horizons (strata):

- 1WWL – weakly water-bearing layer (Sozh sea-on in places where it reaches the daytime surface);
 1AH – ground AH, confined to modern alluvial, marsh, water-glacial and moraine deposits of the Poozersk glaciation;
 2AH – Dneprovsky-Sozh water-glacial horizon; 3AH – Berezinsky-Dneprovsky water-glacial horizon;
 4AH – The Brinev terrigenous horizon; 5AH – combined Silurian-Devonian complex.

Separating weakly permeable layers:

- 1SL – moraine deposits of the Sozh glaciation; 2SL – moraine deposits of the Dnieper glaciation;
 3SL – moraine deposits of the Berezinsky glaciation and clay of the Lower Neogene;
 4SL – deposits of the Upper Devonian and Lower Neogene;
 LIB is the lower impenetrable boundary (rocks of the crystalline basement)

Аналогичные подходы использованы авторами работы [13] при построении геофильтрационной модели ПВ Островецкого региона в составе Государственной программы «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларуси на 2009–2010 годы и на период до 2020 года».

Для воспроизведения на ЧМФМПВ «Bel-PZROm» геологического строения и гидрогеологических условий междуречья «ВОЛГ» моделируемая область в плане разбита нами на квадратные блоки (ячейки) размером 150 м × 150 м (всего 91 блок по оси X и 127 блоков по оси Y). В целом модель содержит 11 557 расчетных ячеек в каждом слое. В модели «Bel-PZROm» сохранены также информационные слои: «абсолютные отметки поверхности земли», «поверхностные воды», «инфильтрационное питание». Слой «абсолютные отметки поверхности земли» при решении геофильтрационных задач в напорах позволяет вычислять глубины залегания уровней грунтовых вод. Слой «поверхностные воды» предназначен для воспроизведения данных по параметрам взаимосвязи ГВ с поверхностными водотоками и водоемами, а также использован для расчленения модельного притока в «речные» блоки на расход ГВ в реки и инфильтрационный расход через зону аэрации. Слой «инфильтрационное питание» необходим для вычисления напоров ГВ и глубин их залегания при заданной величине интенсивности инфильтрационного питания. Слой использован также для воспроизведения инфильтрационного питания ГВ в явном виде при моделировании различных сценариев инфильтрационного водообмена. На внешних (боковых) границах исходной ЧМФМПВ «Bel-PZROm» по всем водоносным горизонтам приняты граничные условия 2-го рода с нулевым расходом. Нижней границей моделируемой области являются слабопроницаемые отложения, подстилающие водоносный силурийский-девонский карбонатный комплекс, – преимущественно глинистые образования кембрия и ордовика, а также непроницаемые породы кристаллического фундамента. На верхней границе модели заданы напоры ГВ на период летне-осенней межени. Река Вилия и ее притоки представляют собой внутренние границы 3-го рода. Методика и технология воспроизведения гидродинамических условий на верхней границе модели «Bel-PZRO», включая интенсивность инфильтрационного питания грунтовых вод, детально изложена в статье [12].

Калибровка ЧГФМ «Bel-PZRO» заключалась в получении заданной величины подземного стока в реки и согласовании модельных и фактических напоров грунтовых вод на период летне-осенней межени путем определения коэффициента взаимосвязи речных и грунтовых вод, коэффициента перетока слабопроницаемого слоя сожской морены и результирующей величины инфильтрационного питания грунтовых вод при заданных граничных условиях и параметрах водоносных горизонтов. Решение производилось подбором путем прогонки ряда прямых задач при различных значениях искомых параметров. На калиброванной модели выполнено моделирование фильтрации подземных вод в естественных условиях (без воспроизведения на модели работы водозаборов). По результатам моделирования оценена структура баланса подземных и поверхностных вод, построены карты напоров подземных вод грунтового и днепровского-сожского водоносных горизонтов, а также карта площадного питания и испарения грунтовых вод. К результатам моделирования, в том числе, относится расчленение результирующей величины площадного питания грунтовых вод на разгрузку в реки (подземный сток), собственно инфильтрационное питание, а также разгрузку грунтовых вод в форме эвапотранспирации [12].

Моделирование фильтрации подземных вод в условиях работы водозаборов. В радиусе 15-километровой зоны БеАЭС эксплуатируются три групповых водозабора: 1) «Островец» – предназначен для водоснабжения г. п. Островец; 2) «Дегенево» – для водоснабжения городка энергетиков АЭС; 3) «Гервяты» – для обеспечения водой инфраструктуры БелАЭС [13]. Из всех водозаборов только «Гервяты» находится на территории, воспроизведенной на детальной ЧМФМПВ «Bel-PZROm».

Участок месторождения «Гервяты» расположен в междуречье Вилии и ее притоков Гозовка и Ошмянка. В геоморфологическом отношении это морено-зандровая и озерно-аллювиальная равнина, включающая холмистую конечную морену, плоскую и пологоволнистую моренную равнину, волнистые поздне-поозерские зандры, цокольные и эрозионные террасы. Поверхность территории сформирована талыми водами поозерского ледника и сожской мореной. Процессами делювиально-пролювиального смыва межхолмовые понижения превращены в денудационные ложбины, которые часто унаследованы современной речной сетью. Наиболее возвышенные участки с абсолютными отметками поверхности 165–185 м приурочены к центральной водораздельной части территории (площадка АЭС). В западной, восточной и южной части преобладают абсолютные отметки 140–160 м, поверхность понижается к долинам рек. Рельеф осложнен ложбинами стока, впадающими в долины Гозовки и Ошмянки. Ложбины слабо заболочены, мелиорированы сетью дренажных каналов [13].

На участке месторождения «Гервяты» продуктивным является березинский-днепровский водно-ледниковый комплекс. Заявленная потребность в воде составляет 3500 м³/сут. Проектный водозабор включает три скважины с производительностью 1167 м³/сут каждая. На ЧМФМПВ «Bel-PZROm» они воспроизведены как граничное условие 2-го рода с $Q = \text{const}$.

Решение гидродинамической задачи выполнено в стационарной постановке. Это означает, что оценивается максимально возможное воздействие водозабора «Гервты» на гидрогеологическую обстановку в течение неограниченного периода времени. По результатам моделирования определена структура водного баланса в пределах моделируемой области, расчетные величины напоров и максимальные понижения уровней подземных вод по все водоносным горизонтам [12]. На рис. 3 и 4 настоящей статьи гидроизогипсы и гидроизоэпезы показаны сплошными линиями черного цвета.

Геофильтрационная схема условий миграции подземных вод. При расчетах переноса загрязнения в водоносных пластах, представленных дисперсными породами, определяющее значение обычно имеет конвективный перенос мигрантов с фильтрационным потоком, а различные формы дисперсии играют подчиненную роль. Поэтому расчёты переноса загрязнения производятся, прежде всего, на основе поля скоростей потока. Учитывая медленность процессов массопереноса, геофильтрационный поток рассматривается как стационарный (квазистационарный).

Значительное влияние на процессы переноса загрязнения оказывает профильная фильтрационная неоднородность потока по проницаемости, обусловленная слоистостью осадочных пород. Существуют два принципиально различных метода учёта такой неоднородности: непосредственной реализации профиля проницаемости при расчётах распределения скоростей переноса по мощности потока или опосредованного учёта профильной неоднородности в модели конвективно-дисперсионного переноса. Во втором случае определяются средние по глубине потока содержания мигрантов, а расчетные значения коэффициента дисперсии находятся по данным натурных наблюдений в аналогичных условиях [17, с. 275]. В созданной нами ЧМФИМПВ «Bel-PZROm» использован первый путь – непосредственной реализации профильной неоднородности пород по проницаемости, который, согласно [17], представляется предпочтительным, поскольку позволяет дать более конкретную оценку влияния профильной неоднородности на распространение контаминантов (загрязняющих веществ) по глубине потока, что особенно важно при изучении миграции загрязнения в потоках большой мощности.

Разнообразие механизмов переноса и рассеяния вещества в водонасыщенных горных породах, сложность форм нахождения загрязняющих веществ в ПВ, отсутствие надежных данных по основным миграционным параметрам водонасыщенных горных пород и грунтов в зоне аэрации, сложная пространственная структура геофильтрационного потока моделируемого объекта предопределяют необходимость выполнения прогнозных оценок качественного состояния ПВ на основе двух подходов: 1) использование наиболее жесткой расчетной схемы, гарантирующей определенный инженерный запас в расчетах; 2) последующее уточнение прогнозных оценок путем более полного учета в расчетных схемах пространственной изменчивости геофильтрационных и геомиграционных параметров, форм переноса вещества и физико-химических взаимодействий в системе вода – порода.

Аналогичный подход был реализован Объединенным институтом энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси при оценке влияния объектов хранения радиоактивных отходов спецпредприятия (СП) «Экорес» на качество подземных вод, используемых для водоснабжения. В работах [24, 25] приведены прогнозные оценки радиоактивного загрязнения грунтовых и межпластовых вод в зоне влияния СП «Экорес» по обращению с радиоактивными отходами.

СП «Экорес» находится вблизи минского городского водозабора «Дражня» и водозаборной скважины н. п. Фелицианово, эксплуатирующих межпластовые водоносные горизонты для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Минска и Минской области.

В рамках обоснования безопасности СП «Экорес» в работе [26] выполнены прогнозные оценки возможного загрязнения напорного водоносного горизонта вблизи н. п. Фелицианово, основанные на консервативном подходе (пессимистичный прогноз), который предполагал условия наиболее быстрой миграции радионуклидов из объектов хранения РАО СП «Экорес» в зону аэрации, грунтовые и межпластовые воды.

Согласно работе [26], «расчетные исследования выполнялись для семи радионуклидов, опасность которых выявлена на основе представленного анализа объектов хранения РАО СП «Экорес», а именно, для ^{14}C , ^{36}Cl , ^3H , ^{90}Sr , ^{239}Pu , ^{226}Ra , ^{238}U .

По консервативным оценкам концентрации радионуклидов ^{14}C , ^{36}Cl , ^{226}Ra , ^{238}U в воде напорного водоносного горизонта вблизи хранилищ РАО могут превысить в различные времена уровни вмешательства от потребления воды. По мере удаления от СП «Экорес» эти концентрации постепенно снижаются, и в месте водозабора содержание ^{36}Cl будет безопасным. Однако концентрации ^{14}C , ^{238}U в напорном водоносном горизонте могут существенно превысить этот критерий безопасности на всем протяжении от СП «Экорес» до места водозабора в н. п. Фелицианово через 150 (^{14}C) и 600 лет (^{238}U) после изоляции хранилища. Загрязнение напорного водоносного горизонта ^{226}Ra может произойти в более поздние сроки (2000 лет и более), причем в концентрациях, существенно превышающих уровень вмешательства.

По пессимистичному прогнозу при несанкционированном размещении скважин с забором воды из напорного водоносного горизонта на расстояниях около 200, 1000, 8800 м дозовые нагрузки населения могут превысить допустимый уровень для рассматриваемых групп населения в течение почти 500 лет как вблизи объектов РАО СП «Экорес», так и вблизи водозабора в н. п. Фелицианово, причем определяющими радионуклидами в последнем случае будут ^{238}U , ^{14}C и ^3H .

Выполненные консервативные прогнозные оценки показывают, что эксплуатация напорного водоносного горизонта может быть небезопасной, что требует принятия мер по предотвращению развития подобных событий».

Понятие «уровень вмешательства» авторы работы [26] не расшифровывают. Будем полагать, что имеется в виду такой дебит водозабора н. п. Фелицианово, при котором радионуклиды в определенный момент времени достигают водозаборной скважины.

Вполне может быть, что вывод авторов [26] о потенциальном загрязнении напорного водоносного горизонта в зоне влияния СП «Экорес» радионуклидами, является правильным. Но этот вывод не подтвержден соответствующими материалами и расчетами. В работах [24–26] нет фактических данных, достаточных для обоснования расчетной схемы фильтрации и миграции подземных вод на территории исследуемого объекта. Авторы работы [26] использовали консервативный подход, который предполагал условия наиболее быстрой миграции радионуклидов из объектов хранения РАО СП «Экорес» в зону аэрации, грунтовые и межпластовые воды. Такого подхода было бы достаточно, если бы авторы работы [26] по результатам прогнозных расчетов установили, что радионуклидное загрязнение не угрожает водозаборам г. Минска и н. п. Фелицианово. Является очевидным, что если загрязнение не произойдет при консервативном подходе, то тем более его не будет по результатам расчетов, в которых будут учтены процессы сорбции и другие физико-химические и гидрогеологические процессы. В связи с этим необходимо признать, что исследования [26] нельзя считать завершенными, так как полученные результаты, с одной стороны, не заслуживают доверия, и, с другой стороны, создают некоторую необоснованную социально-экологическую напряженность из-за возможного загрязнения подземных вод на объектах хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Иные результаты по прогнозу радиационного состояния подземных вод в районе водозабора «Сож» г. Гомеля получены нами еще в 1995–1997 гг. при выполнении НИР «Оценить поведение радионуклидов в геологической среде и динамику изменения радиационного состояния подземных вод в районе техногенного ореола ЧАЭС на территории Беларуси», задания 1 «Уточнить прогноз радиационного состояния подземных вод на водозаборах г. Гомеля»; договор № 32-6-3 (ГБЦД 91-22) в составе Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС в соответствии с распоряжением Президиума АН БССР № 109 от 27.03.1991 г. по договорам с Институтом радиобиологии Академии наук Беларуси. Все расчеты выполнены с помощью численной геомиграционной модели «SOG», созданной на базе вычислительной программы «MTS» (разработчик А. М. Свищев).

При решении миграционных задач в качестве мигранта рассматривался радиоцезий (Cs-137). Было принято, что его поступление в грунтовые воды происходит в виде инфильтрационного питания с концентрацией, пропорциональной поверхностному загрязнению радиоцезием. Данное положение основывалось на результатах, полученных ВСЕГИНГЕО по материалам режимных наблюдений в 1989–1992 гг. и результатам исследований [27–29] по юго-востоку Беларуси.

Плотность поверхностного загрязнения радиоцезием взята по картам радиационной обстановки, составленным Белорусским управлением по гидрометеорологии по состоянию на январь 1991 г. Учитывая данные по содержанию радиоцезия в поверхностных и грунтовых водах юго-востока Беларуси, приняты следующие расчетные концентрации радиоцезия в инфильтрующихся водах: зона с плотностью поверхностного загрязнения $1\text{--}5 \text{ Ки/км}^2$ – $1,0 \text{ Бк/л}$, зона $5\text{--}15 \text{ Ки/км}^2$ – $3,0$, зона $15\text{--}40 \text{ Ки/км}^2$ – $6,0$, зона с плотностью загрязнения более 40 Ки/км^2 – $9,0 \text{ Бк/л}$.

Воды поверхностных водоемов и водотоков считаются незагрязненными. Наиболее характерные для зоны влияния водозабора «Сож» значения мощностей и активной пористости водоносных горизонтов и разделяющих слоев приняты по фондовым материалам, причем в первую очередь использованы результаты разведочных работ ПО «Белгеология» (в настоящее время ГП «НПЦ по геологии») на водозаборе «Сож».

Моделирование миграции радиоцезия при проектной производительности водозабора «Сож» выполнено в двух вариантах: 1) сорбционные процессы не учитывались; 2) сорбция радиоцезия учтена заменой активной пористости (n) на эффективную емкость $N_m = n + K_r$, где K_r – коэффициент распределения. Не имея представительных данных о формах нахождения радионуклидов в подземных водах, с некоторым инженерным запасом, по данным [19, 30, 31], нами принято $K_r = 10$.

Основные результаты расчетов сводятся к следующему:

1. При отборе подземных вод по состоянию на 1991 г. даже через 30–40 лет активность Cs-137 в турон-маастрихтском водоносном горизонте не превышала 0,25 Бк/л на 90–92 % его площади. Лишь на северо-востоке моделируемой области, где в разрезе отсутствуют слабопроницаемые отложения палеогена, появляются «пятна» загрязнения с активностью Cs-137 до 1–2 Бк/л. Подтягивание Cs-137 к водозабору по пласту со стороны загрязненного северо-восточного района не происходило. Таким образом, при сохранении постоянного водоотбора опасность загрязнения радионуклидами подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта на водозаборе «Сож» отсутствует.

2. Увеличение дебита водозабора до проектной величины не ведет к росту масштабов загрязнения турон-маастрихтского водоносного горизонта. Несмотря на высокие скорости фильтрации подземных вод, по мере приближения к водозабору концентрация радионуклидов снижается за счет разбавления чистыми водами, поступающими из питающих водоносных горизонтов.

3. Прогнозная активность Cs-137 в воде, отбираемой из отдельных скважин при проектной производительности водозабора «Сож», достигала 0,35 Бк/л. В 80 % водозаборных скважин активность Cs-137 не превышала 0,1 Бк/л. Можно утверждать, что при условии сохранения чистоты речных вод значимого ухудшения качества подземных вод на водозаборе «Сож» в обозримой перспективе не произойдет.

4. При сорбции радионуклидов на поверхности минерального скелета горных пород загрязнение подземных вод в разрезе ограничивается грунтовым водоносным горизонтом, в котором прогнозная активность Cs-137 через 30 лет не превышала 0,9 Бк/л.

Более детально полученные результаты, а также характеристика использованных материалов, обоснование расчетной схемы фильтрации и миграции загрязняющих веществ изложены в публикациях [21, 27, 28]. В заключение отметим, что основную ценность представляют не числовые значения вычисленных показателей прогноза, а степень их надежности. Доверия заслуживают только те результаты, которые имеют высокий уровень обоснованности.

При геомиграционном моделировании изменения качества подземных вод в междуречье «ВОЛГ» нами принималось, что перенос мигранта в водоносных пластах происходит конвективно-дисперсионным путем. Коэффициенты дисперсивности водонасыщенных песков приняты по литературным источникам [17, 20, 21] одинаковыми для грунтового и межпластовых водоносных горизонтов (комплексов, пластов): коэффициент продольной дисперсии – 3,0 м; коэффициент поперечной дисперсии – 0,3 м, коэффициент задержки – 0,25. Процессы сорбции не учитывались. Наиболее характерные для исследуемого района значения активной пористости водоносных горизонтов и разделяющих слоев приняты по результатам полевых и лабораторных исследований, выполненных РУП «Геосервис» и обработан- ных А. В. Кудельским [13], а также по аналогии с Гомельским регионом [19, 21]: грунтовый водоносный горизонт – 0,10; днепровский-сожский водно-ледниковый комплекс – 0,18; березинский-днепровский водно-ледниковый комплекс – 0,18; бриневский терригенный комплекс – 0,13; силурийский-девонский водоносный комплекс – 0,15. Мощности водоносных горизонтов и разделяющих слоев заданы по материалам полевых работ РУП «Геосервис». Модельные величины напоров межпластовых и грунтовых вод, вычисленные при проектной производительности водозабора «Гервяты», приняты в качестве исходных на боковых границах всех водоносных пластов.

На верхней границе модели «Bel-PZROm» воспроизведены реки, инфильтрационное питание и эвапотранспирационная разгрузка грунтовых вод. При заданных таким образом граничных условиях решена геофильтрационная задача в стационарной постановке. Полученное поле скоростей подземных вод принято за основу при решении геомиграционной задачи.

Схематизация процессов массопереноса в районе площадки для размещения ПЗРО.

Основные аспекты собственно миграционной схематизации сводятся к следующему [10, с. 75]: «1) схематизация влияния процессов массопереноса на расчетную схему фильтрации; 2) схематизация физико-химического взаимодействия подземных вод с горными породами, а также физико-химических превращений, протекающих непосредственно в подземных растворах; 3) выявление относительной значимости отдельных механизмов конвективно-дисперсионного переноса; 4) обоснование целесообразности рассмотрения миграционных процессов в гетерогенных водоносных комплексах – с анализом возможностей сведения гетерогенных комплексов к квазигомогенным; 5) схематизация структуры миграционного потока; 6) схематизация граничных условий миграции; 7) схематизация развития миграционного процесса (в целом) во времени». Принятые нами для расчетов условия миграционной схематизации по каждому из перечисленных пунктов приведены ниже.

1. Численная геомиграционная модель района площадки для размещения ПЗРО БелАЭС ориентирована на моделирование миграции радионуклидов, которые, в силу ничтожно малых концентраций, не оказывают влияния на свойства подземных вод, поэтому принимается, что процессы массопереноса на расчетную схему фильтрации влияния не оказывают.

2. При схематизации физико-химических процессов общие допущения, традиционные для гидродинамической теории миграции, сведены к следующему: 1) термодинамические условия априорно считаются постоянными, независимо от миграционного процесса; 2) миграция каждого из компонентов рассматривается обособленно, без учета взаимного их влияния – и в растворе, и на минеральной фазе; 3) хотя для пластовых растворов характерно многообразие химических состояний содержащихся в них элементов, все оценки проводятся лишь для преобладающих миграционных форм с известными термодинамическими параметрами [10].

3. Максимальный интерес с позиций упрощения расчетной модели представляет оценка относительной значимости конвекции, с одной стороны, и гидродисперсии – с другой, на перенос мигрантов. Расчетные схемы, пренебрегающие гидродисперсией (схемы поршневого вытеснения), дают запас надежности при оценках значений концентрации вдоль траекторий фильтрации, выходящих из источника загрязнения. В численной модели фильтрации и миграции подземных вод «Bel-PZROm» параметры массопереноса задавались в виде диапазона наиболее вероятных значений. Использованы литературные источники, а также материалы Института «Сосны» (Н. М. Ширяева, В. Г. Молодых и др.) и Института природопользования НАН Беларуси (А. В. Кудельский, Н. М. Томина, Г. П. Бровка и др.). Так, в Институте природопользования НАН Беларуси получены [23] асимптотические решения задач конвективно-диффузионного переноса с учетом постоянной скорости конвективного потока влаги и кинетики сорбции водорастворимых соединений при линейной изотерме сорбции. В итоге авторы работы [23] пришли к выводу, что корректная оценка коэффициента гидродисперсии радионуклидов в природных дисперсных средах позволит более адекватно и точно рассчитывать динамику распространения радиоактивных загрязнений.

4. Согласно [10, с. 78–79] схематизация миграционного процесса в гетерогенных водоносных комплексах требует последовательного рассмотрения сменяющих друг друга в пространстве и во времени режимов массопереноса, в которых на первый план выходят различные механизмы миграции (конвекция, механическая дисперсия, молекулярная диффузия, физико-химические взаимодействия). С этой точки зрения можно говорить о многоуровневом протекании миграционного процесса, находящем свое формально-математическое отражение в описании различных стадий процесса различными моделями. Особое значение при этом имеют асимптотические модели переноса, дающие возможность существенно упростить весь последующий анализ; они позволяют использовать в качестве интерпретационных расчетные схемы для гомогенного пласта, в которых гетерогенность среды учитывается или простым ее расчленением на гомогенные элементы, или через некоторые обобщенные (эффективные) параметры. Для слоистых систем начальной асимптотической моделью служит модель послойного переноса, а конечной – модель однородного пласта с осредненными фильтрационными и суммарными емкостными характеристиками. В трещиновато-пористых породах такими асимптотиками служат модели микродисперсии (обмен между трещинами и блоками не проявляется) и предельная модель макродисперсии (пласт ведет себя как квазигомогенный). Важное место в подобной схематизации занимают разведочные расчетные оценки, которыми, в частности, определяются характерные пространственно-временные диапазоны различных режимов переноса, отвечающие различным уровням проявления гетерогенности.

На ЧМФИМПВ «Bel-PZROm» изложенные выше условия реализованы, в основном, в явном виде. В зоне аэрации и слабопроницаемых пластах миграция радионуклидов схематизирована как одномерный процесс, в водоносных горизонтах – как двумерный (плановый) процесс от ПЗРО к дренирующим водотокам. Для схематизации линейной сорбции радионуклидов в потоке подземных вод использован фактор сорбционной задержки.

Потенциальным источником загрязнения подземных вод являются радионуклиды, хранящиеся в ПЗРО. При некоторых чрезвычайных обстоятельствах возможно разрушение контейнеров, в которых хранятся отработанные радиоактивные отходы. В результате они проникают в зону аэрации и далее – в грунтовый водоносный горизонт.

Миграция РАО из расчетных блоков с источником загрязнения рассчитывается путем решения прогнозной задачи на модели «Bel-PZROm» в соответствии с пространственной структурой потока подземных вод и принятыми к расчету миграционными параметрами. Началу расчетного периода соответствует момент времени ($t_0 = 0$), при котором консервативный мигрант (радионуклид, иное загрязняющее вещество) поступает на уровенную поверхность грунтовых вод (на кровлю грунтового водоносного горизонта). Время миграции радионуклида с поверхности земли до уровня грунтовых вод вычисляется аналитически, на основе теории влагопереноса в зоне аэрации.

Моделирование миграции радионуклидов в подземных водах. Моделирование переноса радионуклидов выполнено на 300 лет с временным шагом $\Delta t = 10$ лет, а на 30-летний период – с временным шагом $\Delta t = 365$ сут. Решение получено на моменты времени $t = 1, 2, 3, \dots, 30, 40, 50, \dots, 300$ лет. С некоторым инженерным запасом (в сторону завышения масштабов загрязнения),

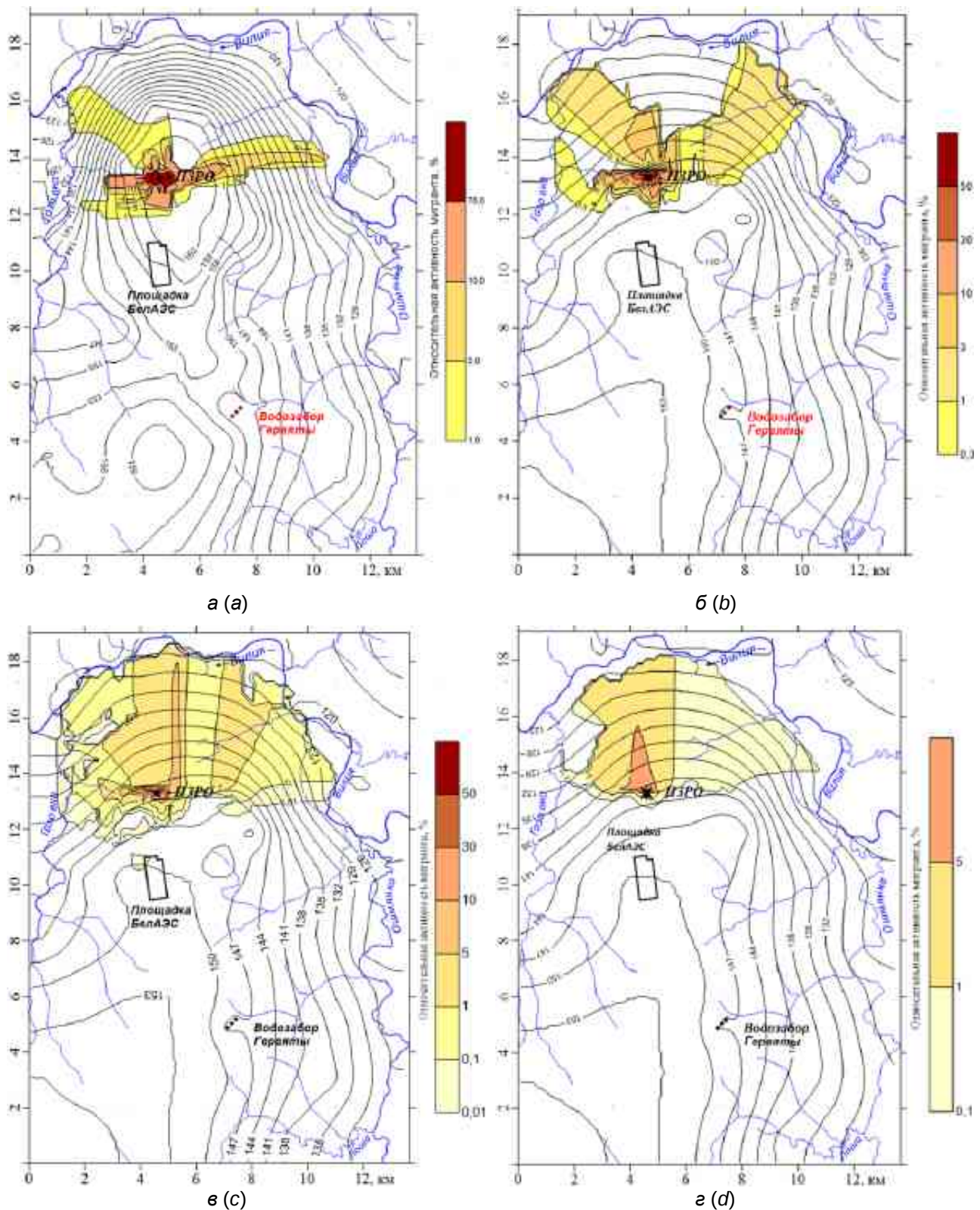


Рис. 3. Прогнозные карты активности радионуклидов в подземных водах грунтового (а), днепровского-сожского (б), березинского-днепровского (в) и бриневского (г) водоносных горизонтов на период времени 300 лет

Fig. 3. Forecast maps of radionuclide activity in the groundwater of the groundwater (a), Dneprovsky-Sozhsky (b), Berezinsky-Dneprovsky (c) and Brinevsky (d) aquifers for point in time 300 years

привязываясь к реальным временным датам, гипотетическая вычислительная схема имеет вид: 2025 г. – создание ПЗРО; 2026 г. – загрузка РАО в ПЗРО; 2027 г. – аварийное разрушение ПЗРО; конец 2029 г. – констатация признаков радионуклидов в грунтовых водах. Таким образом, началу прогнозного периода миграции радионуклидов (момент времени $t_0 = 0$) соответствует начало 2030 г.; конец прогнозного периода – 2330 г. В течение расчетного периода консервативный мигрант (радионуклид) поступает в грунтовый водоносный горизонт с расходом, равным интенсивности инфильтрационного питания в расчетных блоках модели, занимаемых ПЗРО. Концентрация (активность) мигранта на границе (в инфильтрующейся воде) принимается равной 100 % (или условных единиц – у. е.). Такой подход позволяет пересчитать результаты моделирования при любой концентрации мигранта на границе источника загрязнения.

По результатам геомиграционного моделирования определены расчетные значения концентрации мигранта по каждому блоку (ячейке) во всех водоносных горизонтах (пластах) по всему полю моделируемой области на заданные моменты времени. На их основе составлен пакет прогнозных карт возможного радиационного загрязнения подземных вод всех водоносных горизонтов (комплексов, пластов) на 300-летний период. Некоторые из них приведены на рис. 3 и 4. Динамика изменения средней и максимальной активности радионуклидов в подземных водах грунтового, днепровского-сожского, березинского-днепровского и бриневского водоносных горизонтов в очагах загрязнения отражена на рис. 5.

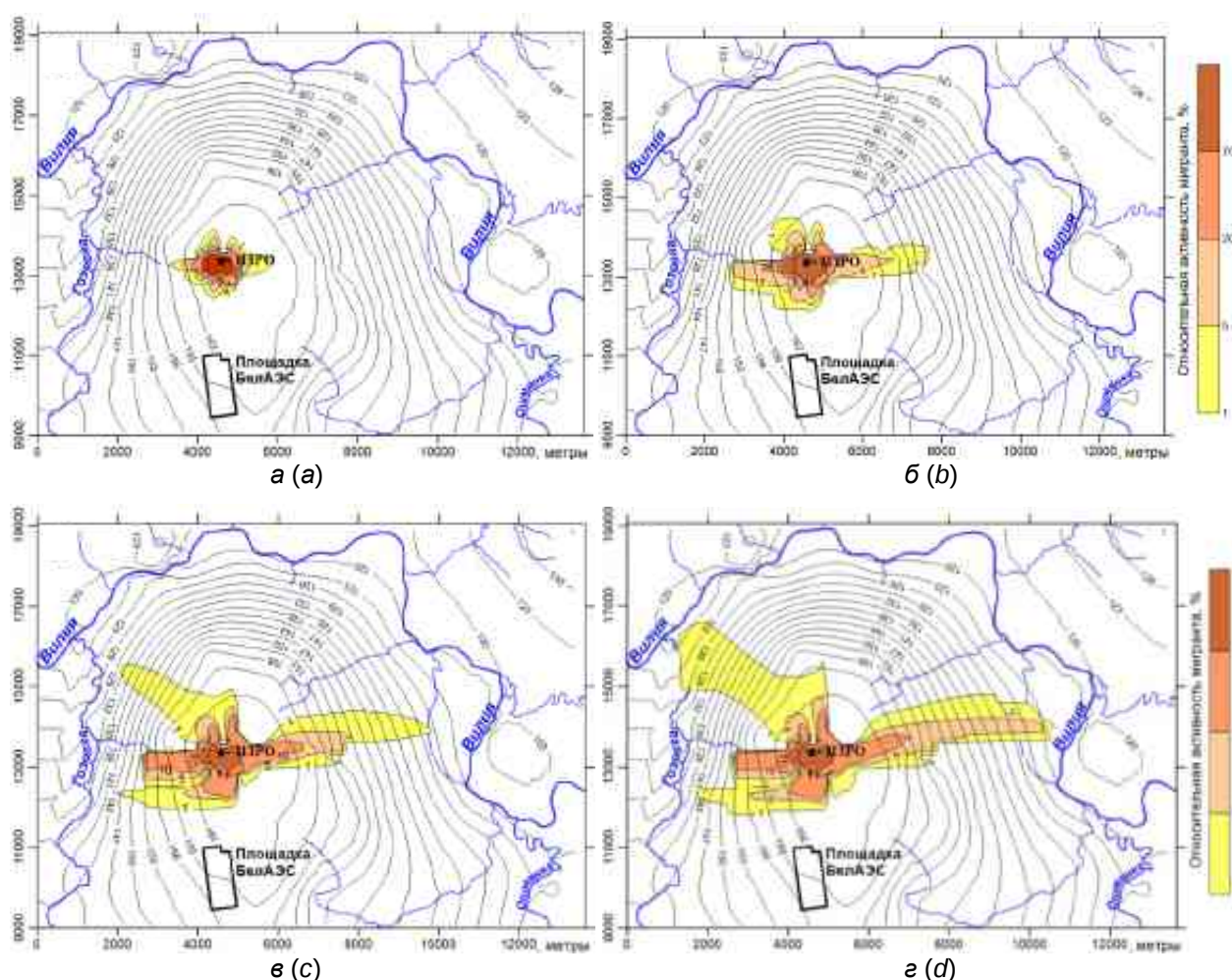
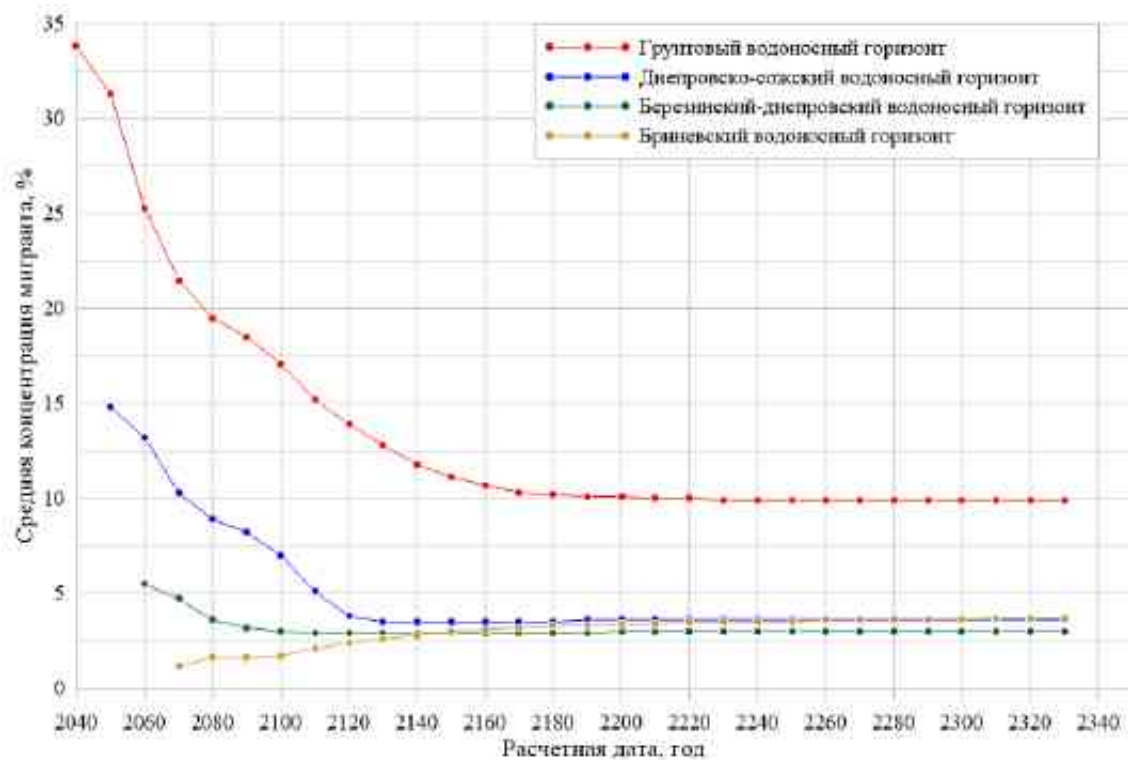
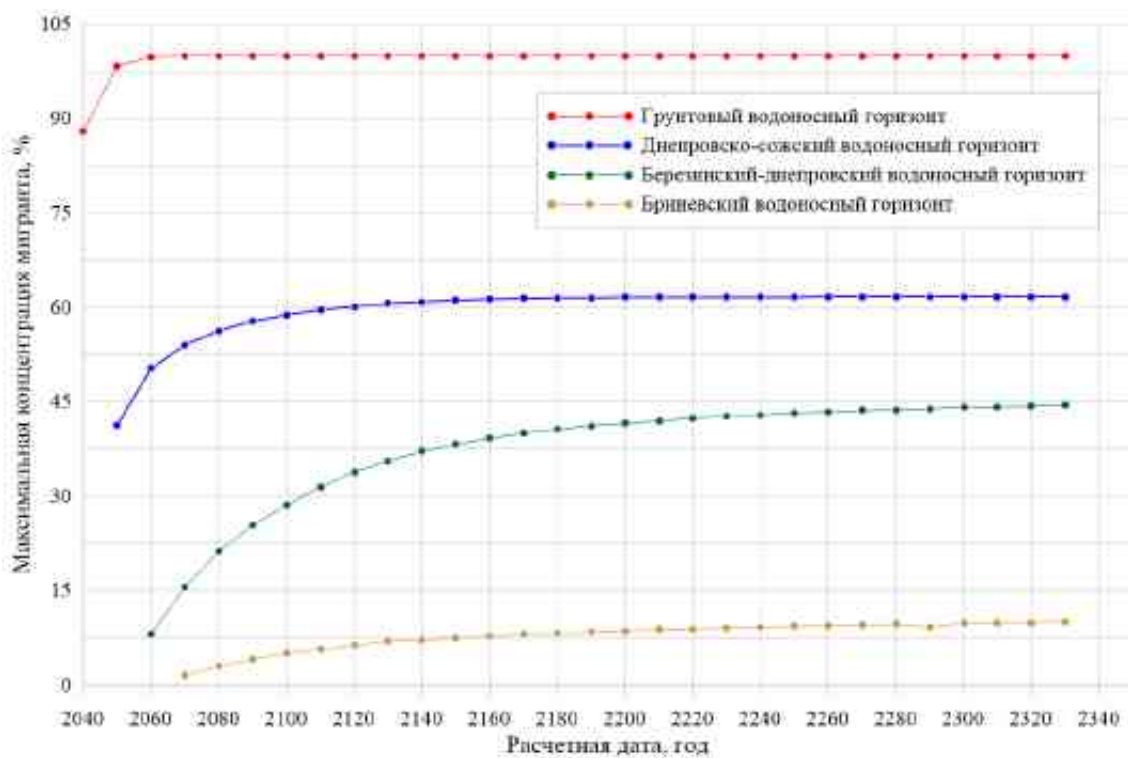


Рис. 4. Прогнозные карты активности радионуклидов в подземных водах грунтового водоносного горизонта на момент времени 20 (а), 50 (б), 100 (в) и 200 (г) лет

Fig. 4. Forecast maps of radionuclide activity in groundwater of the groundwater aquifer for point in time 20 (a), 50 (b), 100 (c) and 200 (d) years



а (a)



б (b)

Рис. 5. Динамика изменения средней (а) и максимальной (б) активности радионуклидов в подземных водах грунтового, днепровско-сожского, березинского-днепровского и бринецкого водоносных горизонтов в ореолах загрязнения

Fig. 5. Dynamics of changes in the average (a) and maximum (b) activity of radionuclides in the groundwater of the groundwater, Dneprovsky-Sozhsky, Berezinsky-Dneprovsky and Brinevsky aquifers in pollution halos

Обсуждение результатов моделирования. Анализ рис. 3–5 показывает, что в междуречье Вилия – Ошмянка – Лоша – Гозовка миграция радионуклидов в плане, вдоль напластования горных пород, протекает крайне медленно. В течение 300 лет очаг загрязнения подземных вод грунтового, днепровско-сожского и березинского-днепровского водоносных горизонтов практически не выходит за пределы моделируемого объекта.

В грунтовом водоносном горизонте примерно через 20 лет наступает стабилизация режима миграции контаминантов – их приток в очаг загрязнения компенсируется оттоком загрязненных грунтовых вод в нижележащие водоносные горизонты.

В днепровском-сожском водоносном горизонте миграция радионуклидов (загрязняющих веществ, контаминантов) идет более интенсивно. За 300-летний период очаг загрязнения достигает рек Гозовка и Вилия. В долине Гозовки происходит частичный поворот очага загрязнения (лента тока с концентрацией мигранта от 0,1 до 1,0 у. е.) в северном направлении, что вызвано влиянием как конфигурации речной сети, так и потока подземных вод на противоположном берегу Гозовки (см. рис. 4). Максимальный уровень загрязнения в днепровском-сожском водоносном горизонте достигает 69,3 %. Через 80–90 лет, как и в грунтовом водоносном горизонте, наступает стационарный режим миграции.

В березинском-днепровском водоносном горизонте максимальный уровень загрязнения не превышает 52 %. Стационарный режим миграции не достигается даже за 300-летний период развития процесса. Однако площадь очага загрязнения расширяется.

В бриневском водоносном горизонте масштабы загрязнения продолжают расти даже спустя 300 лет после возникновения очага загрязнения в грунтовом водоносном горизонте.

В силурийском-девонском водоносном горизонте признаки загрязнения появляются лишь через 80 лет после возникновения очага загрязнения.

Выводы.

1. С целью геомиграционного моделирования потенциального загрязнения подземных вод радионуклидами на территории, ограниченной реками Вилия, Ошмянка, Лоша и Гозовка, создана численная модель геофильтрации и геомиграции. На модели воспроизведены грунтовый, днепровский-сожский, березинский-днепровский, бриневский и силурийский-девонский водоносные горизонты. В центре моделируемой области расположен ядерно-энергетический комплекс БелАЭС. Модель объекта реализована на базе специального программного обеспечения ModTech ЗАО «Геолинк» (г. Москва).

2. Выполнена схематизация процесса миграции подземных вод в районе площадки для размещения ПЗРО (междуречье Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка). Выделены характерные зоны миграции радионуклидов в вертикальном разрезе: зона аэрации; грунтовый и межпластовые водоносные горизонты (пласты); разделяющие слабопроницаемые слои. В зоне аэрации и слабопроницаемых слоях миграция радионуклидов схематизирована как одномерный (нисходящий или восходящий) процесс; в водоносных горизонтах (пластах) – как двумерный (плановый) процесс геофильтрации и геомиграции от ПЗРО к дренирующим водотокам.

3. На созданной модели выполнено моделирование миграции радионуклидов в водонасыщенных породах и дана количественная оценка потенциального влияния источника загрязнения на качество подземных вод. По результатам геомиграционного моделирования составлены прогнозные карты активности радионуклидов в подземных водах грунтового водоносного горизонта на 20, 50, 100 и 200 лет, а на 300-летний период – для подземных вод грунтового, днепровско-сожского, березинского-днепровского и бриневского водоносных горизонтов.

4. Миграция радионуклидов вдоль напластования горных пород протекает крайне медленно. Максимальная скорость миграции не превышает 15,0–17,0 м/год. В течение 300 лет очаг загрязнения грунтовых вод не выходит за пределы междуречья Вилия – Гозовка – Лоша – Ошмянка.

5. В грунтовом водоносном горизонте примерно через 20 лет наступает стабилизация режима миграции контаминантов – их массовый приток в очаг загрязнения компенсируется оттоком загрязненных грунтовых вод в нижележащие водоносные горизонты. Процесс миграции во времени сопровождается ростом площади очага загрязнения и снижением концентрации мигранта в очаге.

6. В днепровском-сожском водоносном горизонте стабилизация режима миграции наступает примерно через 100–120 лет.

7. В бриневском водоносном горизонте максимальная концентрация радионуклидов на конец расчетного периода не превышает 10 у. е., но незначительный рост уровня загрязнения продолжается даже через 300 лет после возникновения очага загрязнения в грунтовом водоносном горизонте.

8. В силурийском-девонском водоносном горизонте признаки загрязнения появляются лишь через 80 лет после возникновения очага загрязнения.

Список использованных источников

1. Стратегия обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 2 июня 2015 г., № 460 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 06.06.2015, 5/40619. – 7 с. – URL: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=12551&p0=C21500460&p1=1&p5=0> (дата обращения: 14.04.2026).
2. Совещание о результатах работы БелаЭС, увеличении электропотребления и предложениях о строительстве новых атомных мощностей // Официальный интернет-портал Президента Республики Беларусь. – URL: <https://president.gov.by/ru/events/sovesanie-o-rezul-tatah-raboty-belaes-uvelichenii-elektropotreblenia-i-predlozeniah-o-stroitel-stve-novyh-atomnyh-mosnostej> (дата обращения: 14.11.2025).
3. Потапова Е. С. Атом перспектив. Развитие ядерной энергетики усиливает экономику Беларуси / Е. С. Потапова, А. М. Каранкевич // Официальный интернет-портал Палаты представителей Национального собрания Республики Беларусь. – URL: <https://house.gov.by/ru/interview-ru/view/atom-perspektiv-razvitie-jadernoj-energetiki-usilivaet-ekonomiku-belarusi-12573/> (дата обращения: 15.04.2026).
4. Обзор состояния ядерной и радиационной безопасности в Республике Беларусь за 2022 год // Интернет-портал Департамента по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. – URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/ff6/dfjims13b2tgwl9jjkrc2j1bw61tuosq/OBZOR_final.pdf (дата обращения: 14.04.2026).
5. Подход к выбору пункта размещения и площадки строительства специализированной организации по обращению с радиоактивными отходами / Н. М. Ширяева [и др.]. – Мн. : Препринт / НАН Беларуси, Объед. инт энергет. и ядер, исслед. – Сосны : ОИЭЯИ – 42, 2010. – 62 с.
6. Состояние и перспективы решения проблемы снижения радиоактивного загрязнения объектов для экологической реабилитации территорий после катастрофы на Чернобыльской АЭС и обеспечение безопасности при обращении с радиоактивными отходами / В. В. Скурат [и др.] // Европа – наш общий дом: Экологические аспекты : пленарные доклады международной научной конференции. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2000. – С. 249–261.
7. Вероятностная оценка долговременной безопасности приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов / Н. В. Горбачева [и др.] // Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров. Вывод из эксплуатации ЯРОО / Труды Второй международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию ФГУП «РАДОН», Сергиев Посад, 23–24 сент. 2020 г. – Сергиев Посад, 2020. – С. 31–35.
8. Кузьмина, Н. Д. Проблемы обеспечения радиационной безопасности при долговременном централизованном хранении радиоактивных отходов в Республике Беларусь / Н. Д. Кузьмина, М. Л. Жемжуров // Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров. Вывод из эксплуатации ЯРОО / Труды Второй международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию ФГУП «РАДОН», Сергиев Посад, 23–24 сент. 2020 г. – Сергиев-Посад, 2020. – С. 77–80.
9. Решение задач охраны подземных вод на численных моделях / Г. Н. Гензель, Н. Ф. Карачевцев, Коносовский [и др.]; под ред. В. А. Мироненко. – М. : Недра, 1992. – 240 с.
10. Мироненко, В. А. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах / В. А. Мироненко, Е. В. Мольский, В. Г. Румынин. – Л. : Недра, 1988. – 279 с.
11. Портал НАН Беларуси : [сайт]. – URL: <https://nasb.gov.by/rus/news/15597/> (дата обращения: 14.04.2026).
12. Жогло, В. Г. Численная геофильтрационная модель подземных вод междуречья Вилия – Гозовка (Республика Беларусь) // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 113–125.
13. Подземные воды Островецкого региона Беларуси / А. В. Кудельский [и др.]. – Мн. : Бел. навука, 2012. – 101 с.
14. Постоянно действующие модели гидrolитосферы территорий городских агломераций (на примере Московской агломерации) / Ю. О. Зеегофер [и др.]. – М. : Наука, 1990. – 198 с.
15. Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ; учеб. пособие / под ред. Р. С. Штенгелова. – М. : Изд-во МГУ, 1994. – 335 с.
16. Гидрогеологическое прогнозирование; пер. с англ. / под ред. М. Г. Андерсона и Т. П. Берта. – М. : Мир, 1988. – 736 с.
17. Шестаков, В. М. Динамика подземных вод : учеб. для студентов вузов / В. М. Шестаков. – 3-е изд. – М. : КДУ, 2009. – 334 с.
18. Шестаков, В. М. Динамика подземных вод / В. М. Шестаков. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1973. – 327 с.
19. Галкин, А. Н. Диффузионно-осмотические свойства глинистых грунтов Гомельского промышленного района : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 04.00.07 / МГУ им. М. В. Ломоносова. М., 1999. – 22 с.
20. Драйвер, Дж. Геохимия природных вод / Дж. Драйвер; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 440 с.
21. Жогло, В. Г. Система численных геофильтрационных моделей верхнего этажа гидrolитосферы юго-востока Республики Беларусь / В. Г. Жогло. – Мн. : Ин-т геол. наук, 2001. – 176 с.
22. Капырин, И. В. Расчетный комплекс GeRa для моделирования процессов геофильтрации и геомиграции радионуклидов / И. В. Капырин, Ю. В. Василевский, А. В. Расторгуйев // Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование и практика : материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 60-летию основания кафедры гидрогеологии МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 22–24 мая 2013 г. – М., 2013 – С. 235–240.
23. Бровка, Г. П. Оценка параметров гидродисперсии и ее влияния на конвективно-диффузионный перенос радиоактивных загрязнений в природных дисперсных средах / Г. П. Бровка, И. Н. Дорожок // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 1. – С. 71–77.

24. Оценка воздействия на грунтовые воды объектов хранения радиоактивных отходов по упрощенной технологии на спецпредприятии «Экорес» / Н. М. Ширяева [и др.]. – Мн. : Препринт / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны ; ОИЭЯИ – 60, 2013. – 48 с.
25. Оценка воздействия на грунтовые воды хранилищ радиоактивных отходов, выполненных по типовому проекту, на спецпредприятии «Экорес» / Н. М. Ширяева [и др.]. – Мн. : Препринт / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны ; ОИЭЯИ-61, 2014. – 36 с.
26. Оценка влияния объектов хранения радиоактивных отходов спецпредприятия «Экорес» на качество подземных вод напорных горизонтов, используемых для водопользования / Н. М. Ширяева [и др.]. – Мн. : Препринт / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны ; ОИЭЯИ – 62, 2014. – 32 с.
27. Жогло, В. Г. Прогноз радиационного состояния подземных вод на водозаборе «Сож» г. Гомеля / В. Г. Жогло, А. Ф. Акулевич // Научные чтения «Проблемы охраны геологической среды» : тез. докл. 1-й науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня рожд. акад. АН БССР Г. В. Богомоллова, Минск, 19–21 апр. 1995 г. / отв. ред. Л. А. Демидович, В. П. Клементьев ; Мин-во образования и науки Респ. Беларусь, Мин-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, Бел. гос. концерн «Белхимнефтепром». – Мн., 1995. – С. 81–82.
28. Акулевич, А. Ф. Исследование радиоактивного загрязнения подземных вод в районе водозабора «Сож» / г. Гомеля / А. Ф. Акулевич, В. Г. Жогло, В. П. Ильин // Поиски и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь : сб. науч. трудов. – Гомель : БелНИПИнефть, 1997. – Вып. 2. – С. 201–206.
29. О радиоактивном загрязнении природных вод и водной миграции радионуклидов на юго-востоке Белоруссии / А. В. Кудельский [и др.] // Доклады АН БССР. – 1990. – Т. 34, № 11. – С. 1039–1042.
30. Кудельский, А. В. Радиоактивное загрязнение и прогноз состояния природных вод Беларуси / А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич, А. А. Петрович // Природные ресурсы. – 1997. – № 4. – С. 41–51.
31. Орадовская, А. Е. Санитарная охрана водозаборов подземных вод / А. Е. Орадовская, Н. Н. Лапшин. – М. : Недра, 1987. – 167 с.

References

1. *Strategiya obrasheniya s radioaktivnymi othodami Belorusskoj atomnoj elektrostancii*. [Strategy for managing radioactive waste of the Belarusian Nuclear Power Plant]. Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus', 2 iyunya 2015 g., № 460 // Nac. pravovoj Internet-portal RB, 06.06.2015, 5/40619, 7 p. URL: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=12551&p0=C21500460&p1=1&p5=0> (accessed April 14, 2026). (in Russian)
2. *Soveshchanie o rezul'tatah raboty BelAES, uvelichenii elektropotrebleniya i predlozheniyah o stroitel'stve novyh atomnyh moshchnostej*. [Meeting on the results of the work of the Belarusian NPP, increase in electricity consumption and proposals for the construction of new nuclear facilities] // Oficial'nyj internet-portal Prezidenta Respubliki Belarus'. URL: <https://president.gov.by/ru/events/sovesanie-o-rezul-tatah-raboty-belaes-uvelichenii-elektropotrebleniya-i-predlozheniyah-o-stroitel'stve-novyh-atomnyh-moshnostej> (accessed November 14, 2025). (in Russian)
3. Potapova E. S., Karankevich A. M. *Atom perspektiv. Razvitie yadernoj energetiki usilivaet ekonomiku Belarusi*. [An atom of perspective. The development of nuclear energy strengthens the economy of Belarus] // Oficial'nyj internet-portal Palaty predstavitelej Nacional'nogo sobraniya Respubliki Belarus'. URL: <https://house.gov.by/ru/interview-ru/view/atom-perspektiv-razvitie-yadernoj-energetiki-usilivaet-ekonomiku-belarusi-12573/> (accessed April 15, 2026). (in Russian)
4. *Obzor sostoyaniya yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti v Respublike Belarus' za 2022 god* [Review of the state of nuclear and radiation safety in the Republic of Belarus for 2022 // Internet portal of the Department of Nuclear and Radiation Safety of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus] // Internet-portal Departamenta po yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti Ministerstva po chrezvychajnym situacijam Respubliki Belarus'. URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/ff6/dfjims13b2tgwl9jkr2j1bw61tuosq/OBZOR_final.pdf (accessed April 14, 2026). (in Russian)
5. *Podhod k vyboru punkta razmeshcheniya i ploshchadki stroitel'stva specializirovannoj organizacii po obrashcheniyu s radioaktivnymi othodami* [An approach to choosing the location and construction site of a specialized radioactive waste management organization] / N. M. Shiryayeva [et al.]. – Minsk, Preprint / NAN Belarusi, Ob'ed. in-t energet. i yader. issled. Sosny; OIEYAI – 42, 2010, 62 p. (in Russian)
6. *Sostoyanie i perspektivy resheniya problemy snizheniya radioaktivnogo zagryazneniya ob'ektov dlya ekologicheskoy reabilitacii territorij posle katastrofy na CHernobyl'skoj AES i obespechenie bezopasnosti pri obrashchenii s radioaktivnymi othodami* / Skurat V. V. [i dr.] [The state and prospects of solving the problem of reducing radioactive contamination of facilities for environmental rehabilitation of territories after the Chernobyl disaster and ensuring safety in radioactive waste management] // Evropa – nash obshchij dom: Ekologicheskie aspekty. Plenarnye doklady mezhdunarodnoj nauch. konf. – Minsk, FTI NANB, 2000, pp. 249–261. (in Russian)
7. *Veroyatnostnaya ocenka dolgovremennoj bezopasnosti pripoverhnostnogo punkta zahoroneniya radioaktivnyh othodov* [Probabilistic assessment of the long-term safety of a near-surface radioactive waste disposal site] / N. V. Gorbacheva [i dr.] // Ohrana okruzhayushchej sredy i obrashchenie s radioaktivnymi othodami nauchno-promyshlennyh centrov. Vывод iz ekspluatatsii YAROO [] TRUDY Vtoroj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 60-letiyu FGUP "RADON", Sergiev Posad, 23–24 sentyabrya 2020: "Poligraf", 2020, pp. 31–35. (in Russian)

8. Kuz'mina, N. D. *Problemy obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti pri dolgovremennom centralizovannom hranenii radioaktivnykh othodov v Respublike Belarus'* [Problems of radiation safety in long-term centralized storage of radioactive waste in the Republic of Belarus] / N. D. Kuz'mina, M. L. Zhemzhurov // *Ohrana okruzhayushchej sredy i obrashchenie s radioaktivnymi othodami nauchno-promyshlennykh centrov. Vyvod iz ekspluatatsii YAROO. TRUDY Vtoroj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 60-letiyu FGUP "RADON".* – Sergiev Posad, 23-24 sentyabrya 2020. Sergiev Posad, 2020, pp. 77–80. (in Russian)
9. *Reshenie zadach ohrany podzemnykh vod na chislennykh modelyakh* [Solving the problems of groundwater protection using numerical models] / G. N. Genzel', N. F. Karachevcev, Konosavskij i dr. // pod red. V. A. Mironenko. Moscow, Nedra, 1992, 240 p. (in Russian)
10. Mironenko V. A., Mol'skij E. V., Rumynin V. G. *Izuchenie zagryazneniya podzemnykh vod v gornodobyvayushchih rayonah* [Study of groundwater pollution in mining areas]. Leningrad, Nedra Publ., 1988, 279 p. (in Russian)
11. Portal NAN Belarusi [sait]. URL: <https://nasb.gov.by/rus/news/15597/> (accessed April 14, 2026). (in Russian)
12. Zhoglo, V. G. *Chislennaya geofil'tracionnaya model' podzemnykh vod mezhdu rek Viliya – Gozovka (Respublika Belarus')* [Numerical geofiltration model of groundwater between the Viliya and Gozovka rivers (Republic of Belarus)]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 113–125. (in Russian)
13. Kudel'skij A. V. [et al.]. *Podzemnye vody Ostroveckogo regiona Belarusi* [Groundwater of the Ostrovets region of Belarus]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2012, 101 p. (in Russian)
14. Zeegofer Yu. O. [et al.]. *Postoyanno dejstvuyushchie modeli gidrolitosfery territorij gorodskih aglomeracij (na primere Moskovskoj aglomeracii)* [Permanent models of the hydrosphere of the territories of urban agglomerations (on the example of the Moscow agglomeration)]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 198 p. (in Russian)
15. *Gidrogeodinamicheskie raschety na EVM* [Hydrogeodynamic computer calculations]: ucheb. posobie / pod red. R. S. SHtengelova. Moscow, Moscow State University Press, 1994, 335 p. (in Russian)
16. *Gidrogeologicheskoe prognozirovanie* [Hydrogeological forecasting]. Translation from English. M. G. Anderson and T. P. Bert (eds.). Moscow, Mir Publ., 1988, 736 p. (in Russian)
17. Shestakov V. M. *Dinamika podzemnykh vod* [Groundwater dynamics] : ucheb. dlya studentov vuzov. – 3-e izd. – Moscow, KDU Publ., 2009, 334 p. (in Russian)
18. Shestakov, V. M. *Dinamika podzemnykh vod* [Groundwater dynamics]. Moscow, Moscow University Press, 1973, 327 p. (in Russian)
19. Galkin, A. N. *Diffuzionno-osmoticheskie svoystva glinistyh gruntov Gomel'skogo promyshlennogo rajona* [Diffusion and Osmotic Properties of Clay Soils in the Gomel Industrial Region] : avtoref. dis. kand. geol.-min. nauk : 04.00.07 / MGU im. M. V. Lomonosova. Moscow, 1999, 22 p. (in Russian)
20. Driver, Dzh. *Geokhimiya prirodnykh vod* [Natural water geochemistry] / Dzh. Driver ; perevod s angl. Moscow, Mir Publ., 1985, 440 p. (in Russian)
21. Zhoglo, V. G. *Sistema chislennykh geofil'tracionnykh modelej verhnego etazha gidrolitosfery yugo-vostoka Respubliki Belarus'* [System of numerical geofiltration models of the upper level of the hydrolithosphere of the south-east of the Republic of Belarus]. Minsk, In-t geol. Nauk Publ., 2001, 176 p. (in Russian)
22. Kapyrin, I. V. *Raschetnyj kompleks GeRa dlya modelirovaniya processov geofil'tracii i geomigracii radionuklidov* [GeRa design complex for modeling the processes of geofiltration and geomigration of radionuclides] / I. V. Kapyrin, Yu. V. Vasilevskij, A. V. Rastorguev // *Gidrogeologiya segodnya i zavtra: nauka, obrazovanie i praktika : materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 60-letiyu osnovaniya kafedry gidrogeologii MGU im. M. V. Lomonosova*, Moscow, 22–24 maya 2013 g. Moscow, 2013, pp. 235–240. (in Russian)
23. Brovka, G. P. *Ocenka parametrov gidrodispersii i ee vliyaniya na konvektivno-diffuzionnyj perenos radioaktivnykh zagryaznenij v prirodnykh dispersnykh sredakh* [Evaluation of hydrodispersion parameters and its effect on convective-diffusion transfer of radioactive contamination in natural disperse media] / G. P. Brovka, I. N. Dorozhok // *Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi*, 2026, vol. 70, no. 1, pp. 71–77. (in Russian)
24. *Ocenka vozdeystviya na gruntovye vody ob'ektov hraneniya radioaktivnykh othodov po uproshchennoj tekhnologii na specpredpriyatii "Ekores"* [Assessment of the impact on groundwater of radioactive waste storage facilities using simplified technology at the Ekores special enterprise] / N. M. Shiryayeva [et al.]. – Minsk : Preprint / NAN Belarusi, Ob'ed. in-t energet. i yader, issled. Sosny; OIEYAI – 60, 2013, 48 p. (in Russian)
25. *Ocenka vozdeystviya na gruntovye vody hranilishch radioaktivnykh othodov, vypolnennykh po tipovomu projektu, na specpredpriyatii "Ekores"* [Assessment of the impact on groundwater of radioactive waste storage facilities performed according to a standard project at the Ekores special enterprise] / N. M. Shiryayeva [et al.]. Minsk, Preprint Publ. / NAN Belarusi, Ob'ed. in-t energet. i yader, issled. Sosny; OIEYAI-61, 2014, 36 p. (in Russian) (in Russian)
26. *Ocenka vliyaniya ob'ektov hraneniya radioaktivnykh othodov specpredpriyatia "Ekores" na kachestvo podzemnykh vod napornykh gorizontov, ispol'zuemykh dlya vodopol'zovaniya* [Assessment of the impact of radioactive waste storage facilities of the Ekores special enterprise on the quality of groundwater of pressure horizons used for water use] / N. M. Shiryayeva [et al.]. NAN Belarusi, Ob'ed. in-t energet. i yader, issled. Sosny; OIEYAI – 62. Minsk, Preprint Publ., 2014, 32 p. (in Russian)
27. Zhoglo, V. G. *Prognoz radiacionnogo sostoyaniya podzemnykh vod na vodozabore "Sozh" g. Gomelya* [Forecast of the radiation state of groundwater at the Sozh water intake in Gomel] / V. G. Zhoglo, A. F. Akulevich // *Nauchnye chteniya "Problemy ohrany geologicheskoy sredy": tezisy dokl. 1-j nauch.-prakt. konf., posvyashchennoj 90-letiyu so dnya razhdeniya akademika AN BSSR G. V. Bogomolova*, Minsk, 19–21 aprelya 1995 g.: otv. red. L. A. Demidovich, V. P. Klement'ev / Ministerstvo obrazovaniya i nauki Respubliki Belarus', Ministerstvo prirodnykh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus', Belorusskij gosudarstvennyj koncern "Belhimneftprom". Minsk, 1995, pp. 81–82. (in Russian)

28. Akulevich, A. F. *Issledovanie radioaktivnogo zagryazneniya podzemnykh vod v rajone vodozabara "Sozh" g. Gomelya* [Study of radioactive contamination of groundwater near the Sozh water intake in Gomel] / A. F. Akulevich, V. G. Zhoglo, V. P. Il'in // *Poiski i osvoenie neftyanykh resursov Respubliki Belarus'*: Sb. nauch. tr. – Vyp. 2. – Gomel', BelNIPIneft' Publ., 1997, pp. 201–206. (in Russian)
29. Kudel'skij, A. V. *O radioaktivnom zagryaznenii prirodnykh vod i vodnoj migracii radionuklidov na yugo-vostoke Belorussii* [On radioactive contamination of natural waters and water migration of radionuclides in the south-east of Belarus] / A. V. Kudel'skij [et al.]. *Doklady AN BSSR*, 1990, vol. 34, no. 11, pp. 1039–1042. (in Russian)
30. Kudel'skij A. V., Pashkevich V. I., Petrovich A. A. *Radioaktivnoe zagryaznenie i prognoz sostoyaniya prirodnykh vod Belarusi* [Radioactive contamination and forecast of the state of natural waters of Belarus]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 1997, no. 4, pp. 41–51. (in Russian)
31. Oradovskaya A. E., Lapshin N. N. *Sanitarnaya ohrana vodozaborov podzemnykh vod* [Sanitary protection of groundwater intakes]. Moscow, Nedra Publ., 1987, 167 p. (in Russian)

Информация об авторе

Жогло Василий Гаверирович – доктор геолого-минералогических наук, доцент, главный научный сотрудник сектора гидрогеологии и гидроэкологии лаборатории региональной геологии и современной геодинамики Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: w.zhoglo50@yandex.ru

Information about the author

Vasily G. Zhoglo – D. Sc. (Geological and Mineralogical), Docent, Chief Researcher at the Hydrogeology and Hydroecology Sector of the Laboratory of Regional Geology and Modern Geodynamics, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: w.zhoglo50@yandex.ru

**ГЕОТЕХНОЛОГИИ.
ДОБЫЧА, ПЕРЕРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ
GEOTECHNOLOGY.
EXTRACTION, PROCESSING AND THE USE
OF SOLID FUEL MINERALS**

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-222-230>
УДК 622.271.6

*Поступила в редакцию 23.04.2026
Received 23.04. 2026*

**ПУТИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ДОБЫЧЕ САПРОПЕЛЯ
ГИДРОМЕХАНИЗИРОВАННЫМ СПОСОБОМ**

**В. Б. Кунцевич, О. М. Гайдукевич, Т. И. Макаренко, И. В. Агейчик,
И. В. Кляуззе, Л. П. Калилец, С. М. Серая, А. Ю. Татков**

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В настоящее время при добыче озерного и погребенного под торфом сапропелей наиболее рационально применение гидромеханизированного способа экскавации с гидротранспортом полученной пульпы в места сушки. Основным недостатком указанного способа является сравнительно небольшое содержание сухого вещества в сапропелевой гидросмеси.

Попытки его повысить приводили к увеличению вязкости сапропелевой пульпы и, как следствие, к повышению энергозатрат на ее гидротранспорт по трубам. В статье по данным опубликованных источников выполнен анализ различных способов воздействия, позволяющих снизить вязкость извлеченного материала. Установлено, что наиболее перспективным направлением является создание технологии и средств механического воздействия на пульпу.

Показано, что перспективной альтернативой существующим способам обезвоживания пульпы является использование геотекстильных контейнеров Geotube в сочетании с химическими реагентами.

В работе представлены также результаты лабораторных исследований кинетики осаждения частиц пульпы из карбонатного и органического сапропелей под действием флокулянтов Бопак А и Аквакристалл+. Установлено, что для карбонатного сапропеля оптимальной является минимальная доза флокулянта Бопак А (0,09 г/л), обеспечивающая снижение концентрации взвешенных частиц в осветленной зоне с 30 до 0,26 г/л за 80 с (степень осветления 99,1 %). Чтобы достичь концентрации такого же значения за указанный период времени, доза введения флокулянта Аквакристалл+ составила 1,5 г/л. Для органического сапропеля оба флокулянта в исследуемом диапазоне доз не обеспечивают быстрого осаждения: концентрация сухого вещества в осветленной зоне снижается до 7–8 г/л только через 24 ч. Полученные результаты объясняются различиями в плотности и коллоидно-химических свойствах частиц разных типов сапропеля.

Ключевые слова: сапропель; вязкость; гидротранспорт; энергозатраты; обезвоживание; контейнеры Geotube; флокулянты.

Для цитирования. Кунцевич В. Б., Гайдукевич О. М., Макаренко Т. И., Агейчик И. В., Кляуззе И. В., Калилец Л. П., Серая С. М., Татков А. Ю. Пути снижения энергозатрат при добыче сапропеля гидромеханизированным способом // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 222–230.

**WAYS TO REDUCE ENERGY CONSUMPTION IN SAPROPEL MINING
BY HYDROMECHANIZED METHOD**

**V. B. Kuntsevich, O. M. Gaidukevich, T. I. Makarenko, I. V. Ageychik,
I. V. Klyauzze, L. P. Kalilets, S. M. Seraya, A. Yu. Tatkov**

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. Currently, the most efficient method for extracting lake and peat-buried sapropel is hydromechanized excavation with hydraulic transport of the resulting slurry to drying sites. The main drawback of this method is the relatively low dry matter content of the sapropel slurry.

Attempts to increase it have resulted in increased viscosity of the sapropel pulp and, consequently, increased energy consumption for its hydraulic transport through pipes. This article, based on published sources, analyzes various methods for reducing the viscosity of the extracted material. It has been established that the most promising approach is the development of technology and means for mechanically affecting the pulp.

It is shown that the use of Geotube geotextile containers in combination with chemical reagents is a promising alternative to existing pulp dewatering methods.

This paper also presents the results of laboratory studies on the kinetics of pulp particle sedimentation from carbonate and organic sapropel using the flocculants Bopak A and Aquacrystal+. It was found that the minimum dose of Bopak A flocculant (0.09 g/L) is optimal for carbonate sapropel, reducing the suspended particle concentration in the clarified zone from 30 to 0.26 g/L in 80 seconds (clarification rate of 99.1 %). To achieve the same concentration over the specified period of time, the Aquacrystal+ flocculant was added at a dose of 1.5 g/L. For organic sapropel, both flocculants in the studied dose range did not provide rapid sedimentation: the dry matter concentration in the clarified zone decreased to 7–8 g/L only after 24 hours. These results are explained by differences in the density and colloidal chemical properties of particles of different sapropel types.

Keywords: sapropel; viscosity; hydrotransport; energy costs; dewatering; Geotube containers; flocculants.

For citation. Kuntsevich V. B., Gaidukevich O. M., Makarenko T. I., Ageychik I. V., Klyauzze I. V., Kalilets L. P., Seraya S. V., Tatkov A. Yu. Ways to reduce energy consumption in sapropel mining by hydromechanized method. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 222–230.

Введение. Основной задачей добычи сапропеля гидромеханизированным способом является получение готовой продукции требуемого качества с максимально возможным уменьшением энергозатрат на транспортировку гидросмеси по трубопроводу и обезвоживание. В первом случае энергозатраты напрямую зависят от вязкости сапропелевой гидросмеси (пульпы).

В любой жидкости под влиянием внешней силы происходит перемещение молекул вещества относительно друг друга. Возникающее при этом трение между молекулами, т. е. внутреннее сопротивление этому перемещению, называется внутренним трением, или вязкостью. Для оценки вязкостных свойств жидкостей пользуются единицами динамической, кинематической и эффективной вязкости. Динамическая вязкость является свойством ньютоновских жидкостей и остается постоянной при любых условиях. Эффективная вязкость зависит от скорости сдвига, температуры, давления и других факторов [1–3]. Сапропелевая пульпа не принадлежит к числу ньютоновских жидкостей, и поэтому внутреннее сопротивление между молекулами в пульпе характеризуется эффективной вязкостью, для снижения которой предложены различные способы.

Важным звеном в технологическом процессе добычи сапропеля является обезвоживание сапропелевой пульпы до нормативных значений. Существующие способы и технологии удаления избыточной влаги из пульпы несовершенны, и поиск новых решений является актуальной задачей.

В настоящее время разработаны и внедрены в производство различные методы обезвоживания, среди которых наиболее часто встречаются центрифугирование и фильтрование. Причем для обезвоживания сапропелей наибольшее распространение получили центрифуги фильтрующего типа [4–6]. Обезвоживание в центрифугах происходит под действием центробежной силы, которая возникает при вращении ротора вокруг своей оси.

Проведенные поисковые исследования по обезвоживанию сапропелей показали, что техническое обеспечение процессов обезвоживания далеко от совершенства. Существующие технологии и устройства по механическому обезвоживанию сапропелевой пульпы не обеспечивают высокую эффективность процессов добычи сапропеля [7]. Зачастую предприятия, занимающиеся добычей и переработкой сапропеля, используют малоэффективную технологию сушки, процесс которой занимает весь летний сезон. Помимо того, что под сушку сапропеля отводятся значительные площади, во время длительной сушки происходит его загрязнение семенами растений, в результате чего происходит снижения качества готовой продукции [8].

Выполненный литературный и патентный поиск показал, что наименее энергозатратный процесс обезвоживания происходит при использовании геотекстильных контейнеров Geotube. Технология обезвоживания сильно обводненных суспензий в контейнерах Geotube широко применяется в Европе и США [9]. Суть технологии заключается в заполнении контейнеров пульпой и ожидании схода свободной воды, после чего производится последующее его заполнение.

В 2024 г. сотрудниками лаборатории выполнены полевые исследования по установлению эффективности использования геосинтетических контейнеров при обезвоживании пульпы, добытой скважинным способом из залежи сапропеля карбонатного и органического типов [10]. Выявлено, что в начальный период обезвоживания мутность в зоне отстаивания зависит от концентрации сухого вещества в гидросмеси и типа сапропелевой пульпы. По мере осаждения по высоте слоя пульпы образуются две зоны, отличные по концентрации: верхняя часть пульпы – осветленная, нижняя – сгущенная,

уплотняющаяся. Скорость расслоения по зонам для сапропелевой пульпы карбонатного и органического типов существенно различаются. Так, уже через 1–2 ч после разлива пульпа из карбонатного сапропеля четко разделяется на осветленную воду и осадок, средняя влажность которого составила 81,1 %. В пульпе органического типа из-за преобладания частиц с малой плотностью начало расслоения по зонам происходит только через 1–2 сут.

В настоящее время для интенсификации процессов обезвоживания различных суспензий, удаления примесей в комплексах водоснабжения, из канализационных и других стоков, технологических циклах для выделения ценных продуктов из отходов широко используются химические реагенты, так называемые коагулянты и флокулянты. С точки зрения химии, коагулянты и флокулянты – неорганические соли, при соприкосновении с водой, образующие элементы с зарядом, противоположным тому, который имеют частички присутствующей в жидкости взвеси [11]. Благодаря разности потенциалов, они притягивают взвешенные частицы, объединяя их в конгломераты. Визуально жидкость мутнеет, образуются хлопья и опускаются под собственной тяжестью на дно. В качестве коагулянтов используют соединения нескольких классов. Они разделяются по масштабу укрупнения осадка и скорости протекания реакций. Дополнительным преимуществом является безопасность полученной продукции, которая при малых концентрациях введения коагулянтов не оказывает негативного влияния на организм человека, животных и растительный мир. На производстве в качестве коагулянтов используются примитивные формы железа, алюминия и магния, характеризующиеся способностью объединяться с поляризационным отрицательным зарядом [12]. Обработка водных суспензий коагулянтами приводит к образованию крупных хлопьев. Однако эти хлопья вследствие рыхлой структуры имеют преимущественно малую плотность, близкую к плотности воды. Хлопья, полученные при коагулировании сапропелевой пульпы, вследствие низкой плотности ($1,012\text{--}1,024\text{ т/м}^3$), оседают медленно, даже если их размер составляет сотни микрометров. Введение в водную суспензию флокулянтов в сочетании с коагулянтами и без них значительно увеличивает скорость осаждения взвешенных частиц, в результате в верхней зоне появляется свободная вода, которая хорошо фильтруется через стенки контейнеров Geotube.

Флокулянты представляют собой органическое соединение, характеризующееся наличием длинной цепочки [12]. Назначение флокулянтов заключается в укреплении образующегося осадка и обеспечение его устойчивости до момента удаления продукции из отстойника. Для промышленного использования в качестве флокулянтов применяются чаще всего полиакриламид, полидадамах и их разновидности. Если речь идет о простых органических флокулянтах, примером могут служить альгинаты, гуаровые смолы, крахмал.

Цель работы – изучить влияние различных способов воздействия на вязкость сапропелевой пульпы и исследовать кинетику осаждения частиц сапропелевой пульпы под воздействием флокулянтов для двух генетических разновидностей сырья (карбонатного и органического сапропелей).

Материалы и методы исследований включают анализ опубликованных материалов по влиянию различных способов воздействия на эффективную вязкость сапропелевой пульпы, экспериментальные работы по отстаиванию частиц твердой фазы сапропелевой пульпы, выполненных в лабораторных условиях с использованием флокулянтов Аквакристалл+ и Бопак А.

Опыты проводили в следующей последовательности. Из карбонатного и органического сапропелей приготовили лабораторные пробы гидросмеси, каждая объемом 1 л, с содержанием сухого вещества 3 и 2 % соответственно. Содержание сухого вещества в гидросмеси смоделировали из условия приближенности к реальной пульпе, соответствующей процессу гидромеханизированной добычи сапропеля. Для проведения лабораторных исследований выбрали карбонатный сапропель т. м. Гала-Ковалевское (исходная влажность $w = 75,6\%$, зольность $A^c = 43,5\%$) и органический сапропель озера Жеринское (исходная влажность $w = 93,4\%$, зольность $A^c = 17,1\%$). В приготовленные пробы гидросмеси вводили флокулянт в количестве 0,3; 0,5 и 5,0 % от массы сухого вещества в пульпе [13]. Через определенный промежуток времени на фиксированной высоте из верхней осветленной зоны отбирали пробы объемом 50 мл и высушивали до абсолютно сухого вещества, после чего определяли концентрацию сухого вещества в граммах в пересчете на объем 1 л. Каждый опыт проводили в трехкратной повторности. Для каждого флокулянта подготавливали свой контрольный образец, в связи с тем, что эксперименты выполняли в разные дни и это могло повлиять на результаты.

Результаты и их обсуждение. В естественном состоянии сапропели представляют собой сложную полидисперсную систему, твердая фаза которой включает природные органические вещества и минеральные примеси. В процессах добычи и переработки сапропелей отмечается изменение степени дисперсности, что сказывается на формировании их структурно-реологических свойств, в том числе и вязкости. Проведенными опытами установлено, что изменение величины эффективной вязкости

с ростом содержания в пульпе фракции менее 50 мкм определяется генетическим типом сапропеля [14]. Органический сапропель представлен рыхлыми частицами, состоящими в основном из легко-гидролизующихся и гуминовых соединений при малом содержании минеральных примесей, поэтому заметно снижается их эффективная вязкость в процессе диспергирования. Кремнеземистый сапропель и карбонатный содержат значительное количество минеральных компонентов, более устойчивых к механическим воздействиям, поэтому уменьшение эффективной вязкости в процессе диспергирования происходит в меньшей степени. Авторы статьи [14] исследовали влияние ультразвука на сапропель применительно к условиям гидромеханизированной добычи и транспортировки полученной пульпы по трубопроводам. Установлено, что при действии ультразвука в течение 2–4 мин достигается существенное уменьшение эффективной вязкости. Поэтому для снижения затрат на прокачивание сапропелевой гидросмеси авторы считают целесообразным устанавливать ультразвуковые излучатели в начале трубопроводного гидротранспорта.

Повышение эффективности гидротранспорта сапропеля возможно также путем создания технологического процесса, основанного на перекачке сапропелевой пульпы с повышенной концентрацией. В настоящее время концентрация сухого вещества в пульпе составляет 2–3 % по массе, в то время как в естественной залежи сапропеля минимальное содержание сухого вещества – 7–9 %. Вязкость пульпы, полученной из такой залежи, даже при полностью разрушенной структуре, доходит до 1 Па·с, что создает повышенные гидравлические сопротивления при перекачке и требует установки дополнительных промежуточных насосных станций [13].

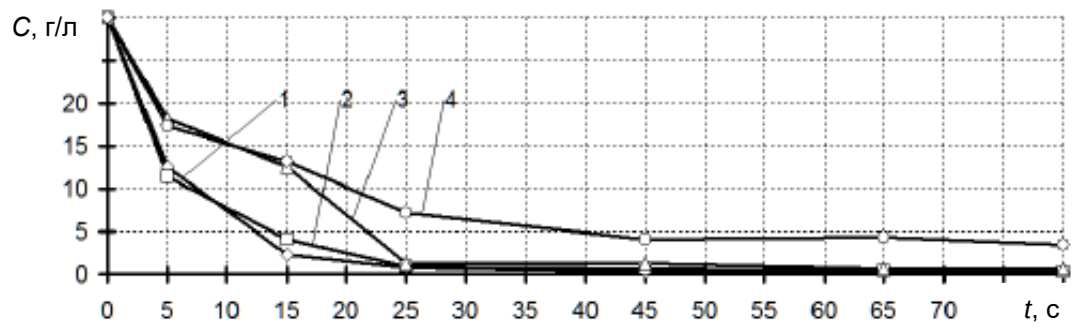
Наряду с механическим воздействием проводили также экспериментальные работы по влиянию на вязкость пульпы химических добавок [13]. В качестве последних использовали растворы полиакриламида, сернокислого алюминия, различных щелочей. Реагенты вводили в процессе механического диспергирования, что обеспечило их равномерное распределение в объеме гидросмеси. Наблюдалось уменьшение вязкости пульпы на 7–10 %, что существенно влияет на энергоемкость транспортирования пульпы по трубопроводу в отстойники. В то же время автор отмечает, что добавку реагента необходимо точно дозировать, так как при незначительном отклонении от заданной дозы вязкость пульпы может резко увеличиться. В связи с этим возникают трудности из-за необходимости подачи реагента в количестве 0,1–0,5 % от массы сухого вещества в гидросмеси. Учитывая концентрацию сухого вещества в гидросмеси 2–3 %, весьма сложно осуществить в непрерывном потоке равномерное перемешивание пульпы с реагентом, количество которого в абсолютных величинах составляет в среднем 150 г на 1 т гидросмеси. Добавлять химические реагенты к более жидкой пульпе не требуется, так как вязкость при концентрации 2–3 % мало отличается от вязкости воды и стоимость дополнительных мероприятий по уменьшению вязкости будет больше стоимости сэкономленной электроэнергии.

Помимо диспергирования, применения ультразвука, введения в гидросмесь химических реагентов ведется поиск и других методов снижения вязкости. Так, исследованиями, проведенными в Ярославском политехническом институте, установлено увеличение текучести сапропеля при воздействии на него вибрации в определенном диапазоне частот, а также использования в гидротранспорте потоков с искусственными пульсациями давления и расхода [15].

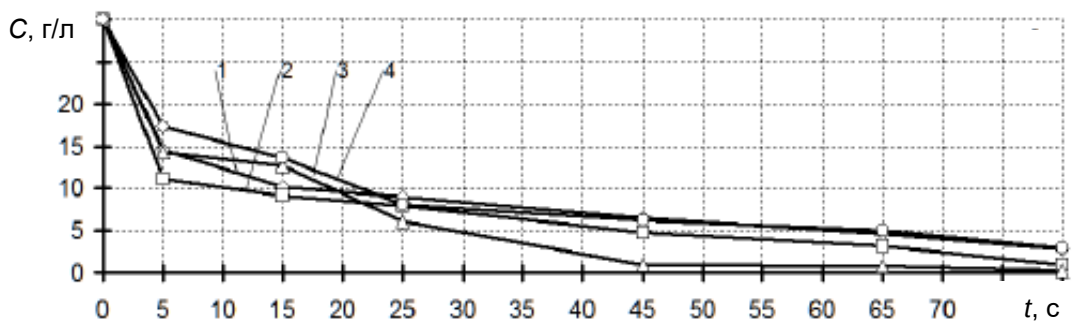
Результаты лабораторных опытов по исследованию динамики концентрации сухого вещества в пульпе из карбонатного и органического сапропелей в верхней осветленной зоне приведены на рисунке.

Исходная концентрация сухого вещества в пульпе из карбонатного сапропеля составила 30 г/л, органического – 20 г/л. Как видно из рисунка, лучший результат получен при использовании флокулянта Бопак А на гидросмеси, приготовленной из сапропеля карбонатного типа. После ввода флокулянта расслоение наступило практически мгновенно: за 5–15 с в лабораторном сосуде образовались хорошо структурированные хлопья, которые сгустились и выпали в осадок, а в верхней части сосуда появилась свободная вода без видимых признаков мутности. За это время концентрация сухого вещества в верхней осветленной зоне уменьшилась с 30,0 до 2,3 г/л при дозе внесения флокулянта 0,09 г/л. В дальнейшем концентрация сухого вещества в осветленной зоне продолжала снижаться и через 80 с приблизилась практически к нулевому значению (0,26 г/л). В контрольном сосуде она снизилась за это время до 3,4 г/л.

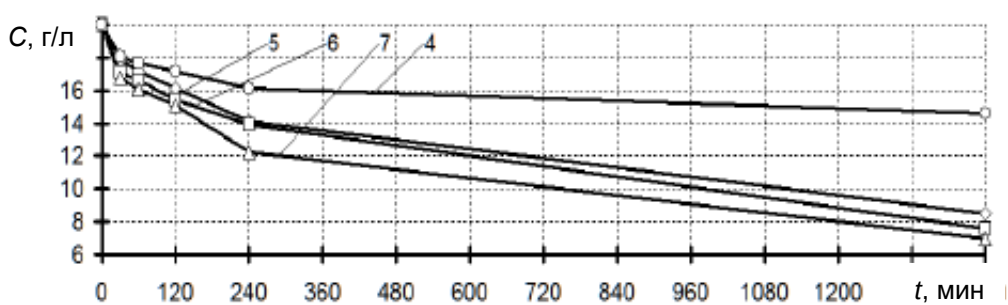
Эффективность применения флокулянта АкваКристалл+ значительно ниже. Причем при введении в пульпу флокулянта Бопак А лучший результат получен при минимальных дозах флокулянта (0,09–0,15 г/л), и наоборот, увеличение дозы введения флокулянта АкваКристалл+ до 1,5 г/л привело к интенсификации процесса образования хлопьев и выпадению их в осадок, на что указывает более интенсивное снижение концентрации сухого вещества в осветленной зоне.



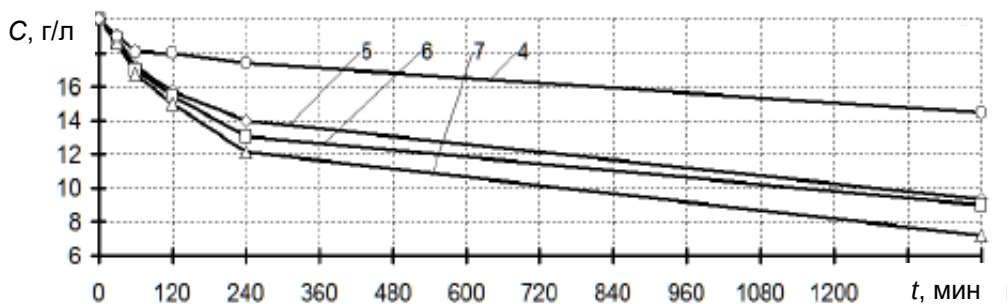
а (а)



б (б)



в (в)



г (г)

Изменение концентрации сухого вещества C (г/л) в пульпе на основе карбонатного (а, б) и органического сапропеля (в, г) в зависимости от времени осаждения t , типа и концентрации флокулянтов Бопак А (а, в) и АкваКристал+ (б, г) (г/л): 1 – 0,09; 2 – 0,15; 3 – 1,5; 4 – 0 (контрольный образец, без флокулянта); 5 – 0,06; 6 – 0,10; 7 – 1,00

Change in the concentration of dry matter C (g/l) in the pulp based on carbonate (a, b) and organic sapropel (c, d) depending on the sedimentation time t , the type and concentration of flocculants Bopak A (a, c) and AquaCrystal+ (b, d) (g/l): 1 – 0.09; 2 – 0.15; 3 – 1.5; 4 – 0 (control sample, without flocculant); 5 – 0.06; 6 – 0.10; 7 – 1.00

Использование флокулянтов Бопак А и АкваКристалл+ для осаждения взвешенных веществ гидросмеси, приготовленной из органического сапропеля, оказалось малоэффективным. Органический сапропель представлен рыхлыми частицами, состоящими в основном из легкогидролизуемых и гуминовых соединений при малом содержании минеральных примесей, поэтому взвешенные в пульпе вещества имеют малую плотность, а введение в гидросмесь флокулянтов указанных выше марок не столь заметно увеличило скорость образования крупных хлопьев и выпадения их в осадок. Необходимо отметить, что и в этом случае через 1–2 ч после введения флокулянтов в лабораторных сосудах появилась граница расслоения, которая разделила гидросмесь на две зоны: верхнюю осветленную и нижнюю осадочную. Причем в сосудах с флокулянтами в осветленной зоне свободная вода находилась без видимых признаков мутности. В контрольных образцах за это время также образовалась граница расслоения, но в верхних зонах наблюдалась заметная мутность, что подтверждено более высокой концентрацией взвешенных веществ. К концу опыта, через 24 ч, высота осветленных зон во всех образцах была практически одинаковой, однако в сосудах с флокулянтами вода в указанных зонах была прозрачной, в то время как в контрольных образцах мутность сохранилась, хотя и в меньшей мере.

Для количественного описания кинетики осаждения получены аппроксимирующие зависимости, представленные в таблице. Коэффициенты детерминации R^2 для всех зависимостей находятся в диапазоне 0,65–0,92, что свидетельствует о хорошем качестве аппроксимации.

Аппроксимирующие зависимости концентрации сухого вещества от времени осаждения сапропелевой пульпы

Approximating dependences of dry matter concentration on the sedimentation time of sapropelic pulp

Тип сапропеля, на основе которого приготовлена пульпа	Флокулянт	Доза, г/л	Уравнения регрессии $C = at^2 - bt + c$ и $C = -bt + c$			R^2
			a	b	c	
Карбонатный	Бопак А	Контроль	0,0074	0,841	25,301	0,90
		0,09	0,0100	1,033	22,008	0,77
		0,15	0,0095	0,994	21,786	0,77
		1,50	0,0094	1,042	26,037	0,91
	АкваКристалл+	Контроль	0,0062	0,750	24,986	0,88
		0,09	0,0058	0,694	23,203	0,79
		0,15	0,0058	0,696	21,784	0,73
		1,50	0,0075	0,887	24,487	0,89
Органический	Бопак А	Контроль	–	0,0026	18,086	0,65
		0,06	–	0,0067	17,732	0,87
		0,10	–	0,0070	17,304	0,86
		1,00	–	0,0072	16,778	0,80
	АкваКристалл+	Контроль	–	0,0031	18,807	0,86
		0,06	–	0,0062	17,802	0,81
		0,10	–	0,0064	17,563	0,77
		1,00	–	0,0074	17,284	0,78

Для пульпы из карбонатного сапропеля кинетика осаждения описывается полиномами второй степени (параболический характер) ($C = at^2 - bt + c$), что соответствует интенсивному осаждению в начальный период с последующим замедлением. Для пульпы из органического сапропеля выявляется зависимость линейного характера ($C = -bt + c$), что свидетельствует о равномерном медленном осаждении без выраженной начальной стадии.

Заключение. Повышение эффективности гидротранспорта сапропеля по трубам до отстойника (контейнеров Geotube) возможно путем снижения эффективной вязкости пульпы. В статье по данным опубликованных источников рассмотрены различные способы, в том числе механическое воздействие и использование химических добавок, позволяющие снизить данный показатель. Анализ предложенных способов показывает, что предпочтение следует отдать механическим способам. Это обусловлено тем, что добавки необходимо вводить в количестве 0,1–0,5 % от массы сухого вещества в пульпе (в среднем 150 г реагента на 1 т пульпы), поэтому весьма сложно осуществить в непрерывном потоке равномерное перемешивание компонентов.

Анализ технологий и механических средств по обезвоживанию сапропелей показал, что техническое обеспечение процессов обезвоживания в настоящее время далеко от совершенства.

В Республике Беларусь предприятия, занимающиеся добычей и переработкой сапропеля, применяют малоэффективную технологию сушки, процесс которой занимает весь летний сезон. Между тем выполненный литературный и патентный поиск показал, что наименее энергозатратный процесс обезвоживания происходит при использовании геотекстильных контейнеров Geotube, которые имеют свойство пропускать через стенки свободную воду и задерживать взвешенные частицы сапропеля. Интенсивность сушки в контейнерах можно существенно ускорить, применяя коагулянты и флокулянты. Благодаря разности потенциалов они притягивают взвешенные частицы, объединяя их в конгломераты, которые под собственной тяжестью опускается на дно. По мере осаждения, по высоте слоя пульпы образуются две зоны: верхняя – осветленная, нижняя – сгущенная, уплотняющаяся. В верхней зоне находится практически свободная вода, которая хорошо удаляется через стенки контейнеров Geotube.

Выполненные авторами статьи лабораторные опыты показали, что скорость расслоения сапропелевой пульпы на две зоны зависит от марки и дозы внесения флокулянта, типа сапропелевой пульпы, концентрации в пульпе сухого вещества.

Список использованных источников

1. Технический анализ торфа. – М. : Недра, 1992. – 431 с.
2. Исследование работы центробежного насоса на сапропелевой пульпе. Гидротранспорт сапропеля / Ю. Ф. Коротков, А. П. Пивоваров, Н. И. Бобин, А. В. Мельников // Сборник научных трудов. – М. : ВНИИПИ гидротрубопровод, 1987. – С. 87–96.
3. Лецко, А. П. Исследование напряжения сдвига сапропеля / А. П. Лецко // Тезисы докладов к совещанию по физике-химии торфа. – Мн. : Ин-т торфа, 1976. – С. 45–46.
4. Хименков, И. А. Центрифуга для обезвоживания компонентов кормов / И. А. Хименков, И. С. Шестопапов // Вестник Курганский ГСХА. – 2013. – № 2. – С. 61–62.
5. Патент № 202120558/05 РФ, 27.11.2012. Центрифуга / Фоминых А. В. – 2012. – Бюл. № 33.
6. Патент № 2002130104/12 РФ, 10.07.2004. Фильтрующая центрифуга для обезвоживания сапропеля / Тарасов Ю. Д., Рыжих А. Б., Прялухин А. Ф. – 2002.
7. Способы обезвоживания сапропеля / Т. Г. Утенкова, Э. А. Кремчеев, Д. С. Громыка, О. Ю. Короткова // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 4 (150). – С. 45–52.
8. Дементьев, В. А. Промышленная добыча сапропеля уже в России / В. А. Дементьев, С. М. Штин // Гидротехника. – 2019. – № 1. – С. 64–66.
9. Аджиенко, В. Е. Технология и контейнеры Geotube – Новый процесс обезвоживания с известными преимуществами / В. Е. Аджиенко // Национальный каталог «Техника и технологии ЖКХ» – приложение к журналу «ЖКХ: журнал для руководителя и главного бухгалтера». – 2009. – № 1. – 1 с.
10. Разработка и апробация в опытных условиях элементов скважинной системы гидродобычи и гидротранспорта сапропеля и торфосапропеля, залегающих под торфом : отчет о НИР (промежуточный) / НАН Беларуси, Ин-т природопользования ; рук. Б. В. Курзо. – Мн., 2024. – 101 с. – № ГР20210174.
11. Отличия флокулянтов от коагулянтов // Интернет-портал инженеринговой компании Asia Water Service. – URL: <https://waterservice.kz/blog/art34.html> (дата обращения: 02.04.2026).
12. Баран, А. А. Флокулянты в биотехнологии / А. А. Баран, А. Я. Тесленко – Л. : Химия, 1990 – 144 с.
13. Кшондзер, Э. Г. Изменение вязкости сапропелевой пульпы. Гидротранспорт сапропеля / Э. Г. Кшондзер // Сборник научных трудов. – М. : ВНИИПИ гидротрубопровод, 1987. – С. 41–43.
14. Лиштван, И. И. Влияние дисперсности на реологические и технологические свойства сапропелей / И. И. Лиштван, И. В. Косаревиц // Торфяная промышленность. – 1986. – № 6. – С. 28–31.
15. Марченков, В. П. Гидравлический транспорт грунтов / В. П. Марченков, Б. М. Луговкин. – Ярославль : ЯПИ, 1985. – 46 с.

References

1. *Tekhnicheskij analiz torfa* [Technical analysis of peat]. Moscow, Nedra Publ., 1992, 431 p. (in Russian)
2. Korotkov Yu. F., Pivovarov A. P., Bobin N. I., Melnikov A. V. *Issledovanie raboty centrobezhnogo nasosa na sapropel'noj pul'pe. Gidrotransport sapropelya* [A study of the operation of a centrifugal pump using sapropel pulp. Hydrotransport of sapropel]. *Sbornik nauchnyh trudov* [Collection of scientific papers]. Moscow, VNIPI gidrotruboprovod Publ., 1987, pp. 87–96. (in Russian)
3. Letsko A. P. *Issledovanie napryazheniya sdviga sapropelya* [Study of shear stress of sapropel]. *Tezisy dokladov k soveshchaniyu po fizike-himii torfa* [Abstracts of papers for the meeting on the physics and chemistry of peat]. Minsk, Institut Torfa Publ., 1976, pp. 45–46. (in Russian)

4. Khimenkov I. A., Shestopalov I. S. *Centrifuga dlya obezvozhvaniya komponentov kormov* [Centrifuge for dehydration of feed components]. *Vestnik Kurganskij GSKHA = Bulletin of Kurgan State Agricultural Academy*, 2013, no. 2, pp. 61–62. (in Russian)
5. Fominykh A. V. *Centrifuga* [Centrifuge]. Patent RF no. 202120558/05, 2012.
6. Tarasov Yu. D., Ryzhikh A. B., Pryalukhin A. F. *Fil'truyushchaya centrifuga dlya obezvozhvaniya sapropelya* [Filter centrifuge for dehydration of sapropel]. Patent RF № 2002130104/12, 2004.
7. Utenkova T. G., Kremcheev E. A., Gromika D. S., Korotkova O. Yu. *Sposoby obezvozhvaniya sapropelya* [Methods of dehydrating sapropel]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*, 2020, no. 4 (150), pp. 45–52. (in Russian)
8. Dement'yev V. A., Shtin S. M. *Promyshlennaya dobycha sapropelya uzhe v Rossii* [Industrial production of sapropel is already in Russia]. *Gidrotekhnika = Hydraulic Engineering*, 2019, no. 1, pp. 64–66. (in Russian)
9. Adzhienko V. E. *Tekhnologiya i kontejnery Geotube – Novyj process obezvozhvaniya s izvestnymi preimushchestvami* [Geotube Technology and Containers – A New Dewatering Process with Well-Known Benefits]. *Nacional'nyj katalog "Tekhnika i tekhnologii ZHKKH" – prilozhenie k zhurnalu "ZHKKH: zhurnal dlya rukovoditelya i glavnogo buhgaltera"* [The National Catalogue "Equipment and Technologies for Housing and Public Utilities" is a supplement to the journal "Housing and Public Utilities: A Journal for Managers and Chief Accountants"], 2009, no. 1, 1 p. (in Russian)
10. Razrabotka i aprobatsiya v opytnykh usloviyakh elementov skvazhinnoj sistemy gidrodobychi i gidrotransporta sapropelya i torfosapropelya, zalegayushchih pod torfom [Development and testing in experimental conditions of elements of a borehole system for hydraulic extraction and hydraulic transport of sapropel and peat-sapropel located under peat]. *Otchet o NIR (promezhutochnyj)* [Research report (intermediate)]. Institute of Nature Management of the NAS of Belarus, supervisor B. V. Kurzo. Minsk, 2024, 101 p., St. Reg. no. 20210174. (in Russian)
11. *Otlichiya flokulyantov ot koagulyantov* [Differences between flocculants and coagulants]. *Internet-portal inzhiniringovoy kompanii Asia Water Service* [Internet portal of the engineering company Asia Water Service]. URL: <https://water-service.kz/blog/art34.html> (accessed April 2, 2026). (in Russian)
12. Baran A. A., Teslenko A. Ya. *Flokulyanty v biotekhnologii* [Flocculants in biotechnology], Leningrad, Himiya Publ., 1990, 144 p. (in Russian)
13. Kshondzer E. G. *Izmenenie vyazkosti sapropelevoj pul'py. Gidrotransport sapropelya* [Changes in the viscosity of sapropel pulp. Sapropel hydrotransport]. *Sbornik nauchnykh trudov* [Collection of scientific papers]. Moscow, VNIPI gidrotruboprovod Publ., 1987, pp. 41–43. (in Russian)
14. Lishtvan I. I., Kosarevich I. V. *Vliyanie dispersnosti na reologicheskie i tekhnologicheskie svoystva sapropelej* [The influence of dispersion on the rheological and technological properties of sapropels]. *Torfyannaya promyshlennost' = Peat Industry*, 1986, no. 6, pp. 28–31. (in Russian)
15. Marchenkov V. P., Lugovkin B. M. *Gidravlicheskij transport gruntov* [Hydraulic transport of soils], Yaroslavl, YAPI Publ., 1985, 46 p. (in Russian)

Информация об авторах

Кунцевич Виктор Болеславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Гайдукевич Олег Михайлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Макаренко Татьяна Ивановна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: makarenko.IP@mail.ru

Агейчик Инна Валерьевна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: ageichik.iv@mail.ru

Кляуззе Ирина Валентиновна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Information about the authors

Victor B. Kuntsevich – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Oleg M. Gaidukevich – Ph. D. (Technical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Tatiana I. Makarenko – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: makarenko.IP@mail.ru

Inna V. Ageychik – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: ageichik.iv@mail.ru

Irina V. Klyauzse – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Калилец Людмила Петровна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Серая Светлана Михайловна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Татков Антон Юрьевич – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Lyudmila P. Kalilets – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Svetlana M. Seraya – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Anton Yu. Tatkov – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-231-238>
УДК 662.731

Поступила в редакцию 15.04.2026
Received 15.04.2026

ВЛИЯНИЕ ЩЕЛОЧНОЙ МОДИФИКАЦИИ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ НА АДсорбЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПРОДУКТОВ ТЕРМОЛИЗА

Т. Я. Царюк, Ю. Ю. Навоша, Т. В. Соколова, И. П. Фалюшина,
А. С. Марзан, В. С. Пехтерева, М. Г. Калантаров

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Проведена химическая модификация целлюлозосодержащего сырья (опилочная и погребенная древесина) гидроксидом натрия. На основании анализа ИК-спектров исходной и модифицированной древесины установлено, что в результате обработки гидроксидом натрия наблюдается уменьшение интенсивности полос поглощения карбонильных групп в области и увеличение интенсивности полос поглощения карбоксилат ионов свидетельствует о взаимодействии иона натрия с N-карбоксиметил и N-карбоксильными группами.

Анализ интенсивности полосы поглощения карбонильных групп в области 1740 см^{-1} показал высокую скорость взаимодействия с исследуемыми образцами древесины. После 60-минутной обработки около 80 % активных групп вступают в реакцию взаимодействия. Проведен термолиз модифицированных образцов древесины при температуре $400\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ при соотношении компонентов $1 : 1$; $1 : 0,5$; $1 : 1,5$. Установлено, что при оптимальном соотношении компонентов $1 : 1$ в исследуемом температурном диапазоне образуется активированный уголь с хорошо развитой системой микропор. Адсорбционная активность по йоду составляет около 70 % и находится на уровне товарных аналогов.

Ключевые слова: опил лиственных пород; погребенная древесина; гидроксид натрия; ИК-спектроскопия; адсорбционная активность.

Для цитирования. Царюк Т. Я., Навоша Ю. Ю., Соколова Т. В., Фалюшина И. П., Марзан А. С., Пехтерева В. С., Калантаров М. Г. Влияние щелочной модификации целлюлозосодержащего сырья на адсорбционные свойства продуктов термолиза // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 231–238.

INFLUENCE OF ALKALINE MODIFICATION OF CELLULOSE-CONTAINING RAW MATERIALS ON THE ADSORPTION PROPERTIES OF THERMOLYSIS PRODUCTS

T. Ya. Tsaryuk, Yu. Yu. Navosha, T. V. Sokolova, I. P. Falyushina,
A. S. Marzan, V. S. Pekhtereva, M. G. Kalantarov

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. Chemical modification of cellulose-containing raw materials (sawdust and buried wood) with sodium hydroxide was carried out. Based on the analysis of the IR spectra of the original and modified wood, it was found that as a result of treatment with sodium hydroxide, a decrease in the intensity of the absorption bands of carbonyl groups in the area is observed and an increase in the intensity of the absorption bands of carboxylate ions indicates the interaction of the sodium ion with N-carboxymethyl and N-carboxyl groups. An analysis of the intensity of the absorption band of carbonyl groups in the region of 1740 cm^{-1} showed a high rate of interaction with the studied wood samples. After 60 minutes of processing, about 80 % of the active groups react. Thermolysis of modified wood samples was carried out at a temperature of $400\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ with the ratio of components $1 : 1$; $1 : 0,5$; $1 : 1,5$. It has been established that at an optimal ratio of $1 : 1$ components in the studied temperature range, activated carbon with a well-developed micropore system is formed. The adsorption activity of iodine is about 70% and is at the level of commercial analogues of wood.

Keywords: hardwood sawdust; buried wood; sodium hydroxide; IR spectroscopy; adsorption activity.

For citation. Tsaryuk T. Ya., Navosha Yu. Yu., Sokolova T. V., Falyushina I. P., Marzan A. S., Pekhtereva V. S., Kalantarov M. G. Influence of alkaline modification of cellulose-containing raw materials on the adsorption properties of thermolysis products. *Nature Management*, 2026, no. 1, pp. 231–238.

Введение. Одним из эффективных путей структурирования углеродсодержащих материалов, в том числе и торфа, изменения выхода, направленного образования и свойств продуктов термической обработки, а также получения высокоактивных сорбентов с заданной пористой структурой является метод введения в исходное сырье различных неорганических и органических соединений с последующей термической обработкой, т. е. метод химической активации. Воздействие неорганических соединений

на процесс термического распада материалов растительного происхождения определяется их кислотно-основными свойствами.

При получении активированных углей методами химической активации используют, главным образом, некарбонизованные древесные материалы. Под воздействием активирующих агентов при нагреве до температуры 400–700 °С происходит превращение такого сырья в активированные угли [1]. При этом кислород и водород избирательно удаляются из углеродсодержащего материала с одновременной его карбонизацией и активацией.

Актуальной задачей является отработка способа термической деструкции предварительно модифицированного целлюлозосодержащего материала с целью получения активированных углей, сопоставимых по адсорбционным свойствам с товарными аналогами.

Цель работы – изучить механизм и кинетику взаимодействия модифицирующего агента (гидроксид натрия) с древесиной и установить влияние модификации на адсорбционные свойства продуктов термолиза погребенной в торфяной залежи древесины и древесины твердолиственных пород. Включение в исследование погребенной древесины, большие объемы которой образуются при подготовке площадей на торфяных месторождениях для добычи торфа, может рассматриваться как изучение возможности ее использования в качестве альтернативного сырья для производства активированных углей.

Объекты и методы исследования. Для проведения исследований использовали погребенную древесину и древесину твердолиственных пород (опил дуба и березы). Модификацию проводили обработкой древесины гидроксидом натрия в соотношении 1 : 0,5; 1 : 1 и 1 : 1,5. Для этого к исходному сырью добавляли безводный гидроксид натрия в приведенном выше соотношении, затем в смесь вводили две части воды, перемешивали и выдерживали на воздухе 30 мин с последующей промывкой образца. Термолиз полученных образцов проводили на лабораторной установке (рис. 1) при температурах 400 и 500 °С.

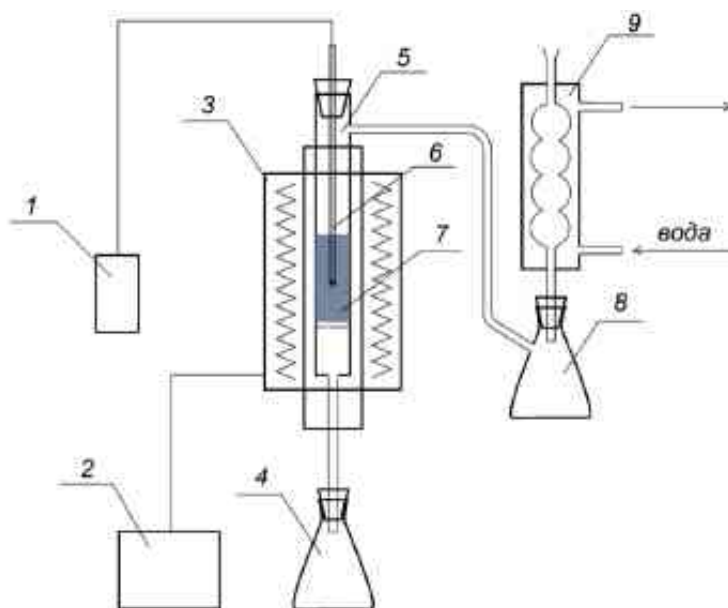


Рис. 1. Лабораторная установка пиролиза и парогазовой активации с вертикальной ретортой:
1 – цифровой термометр; 2 – блок питания печи; 3 – печь электрическая; 4 – сосуд для сбора жидких продуктов пиролиза; 5 – реторта с образцом; 6 – термопара; 7 – термолизуемый образец; 8 – сосуд для сбора сконденсированных летучих продуктов пиролиза; 9 – холодильник

Fig. 1. Laboratory pyrolysis and steam-gas activation unit with vertical retort:
1 – digital thermometer; 2 – furnace power supply; 3 – electric furnace; 4 – vessel for collecting liquid pyrolysis products; 5 – retort with sample; 6 – thermocouple; 7 – thermolysable sample; 8 – vessel for collecting condensed volatile pyrolysis products; 9 – refrigerator

Адсорбционные свойства полученных активированных углей определяли по общепринятым методикам: адсорбционную активность по йоду – (ГОСТ 6217–74), по метиленовому голубому – (ГОСТ 7753–74). Исследование механизма и кинетики взаимодействия гидроксида натрия с образцами древесины проводили методом ИК-спектроскопии с Фурье-преобразованием IRPrestige-21 (Shimadzu) методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). При исследовании использовали приставку однократного отражения MIRacle с призмой ZnSe.

Результаты и их обсуждение. Исследование механизмов взаимодействия, протекающих при модификации древесины гидроксидом натрия, выполнено методом ИК-спектроскопии на образцах древесины дуба. На рис. 2 приведены ИК-спектры исходной древесины и древесины после обработки гидроксидом натрия.

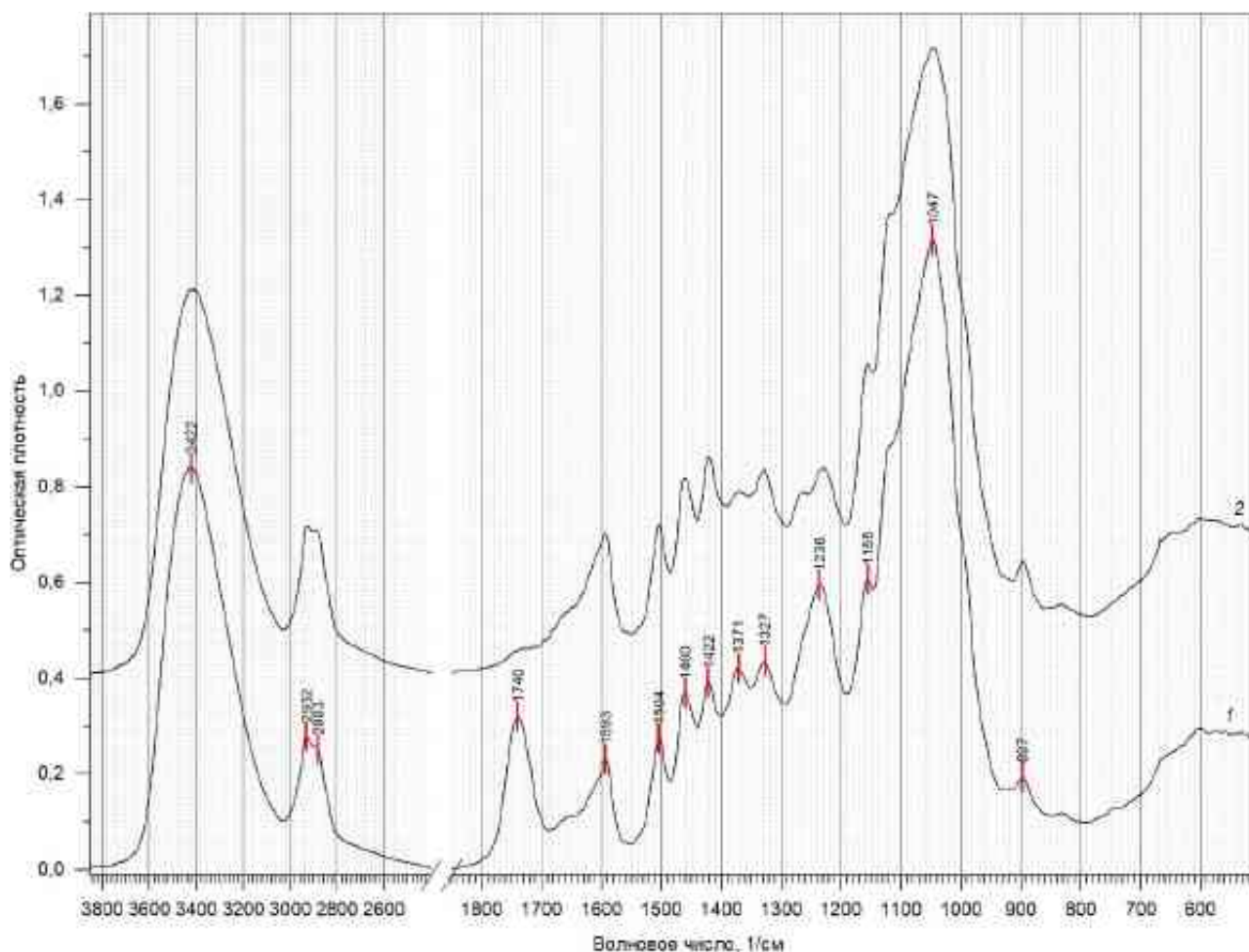


Рис. 2. ИК-спектры древесины дуба:
1 – исходный образец; 2 – образцы после обработки гидроксидом натрия

Fig. 2. IR spectra of oak wood: 1 – initial sample; 2 – after treatment with sodium hydroxide

Как следует из приведенных данных, на спектре исходной древесины наблюдаются полосы поглощения, представленные в таблице.

Полосы поглощения древесины дуба

Absorption bands of oak wood

Волновое число, см ⁻¹	Отнесение полос поглощения [2, 3]
3422	Широкая полоса валентных колебаний связей О–Н (гидроксильные группы в целлюлозе, гемицеллюлозе и лигнине)
2932–2883	Валентные колебания связи С–Н (метильные/метиленовые группы в лигнине/целлюлозе/гемицеллюлозе)
1740	Валентные колебания С=О ацетильных групп в гемицеллюлозе
1593, 1504	Валентные колебания связи С=С ароматического кольца в лигнине
1460	Деформационные колебания CH ₂ (все компоненты древесины)
1422	Деформационные (ножничные) колебания CH ₂ группы целлюлозы

Окончание таблицы

Волновое число (см^{-1})	Отнесение полос поглощения [2, 3]
1371	Деформационные колебания метильных групп в лигнине/гемицеллюлозе
1327, 1236	Колебания ароматического кольца сиригильного типа и колебания С–О связи в лигнине и ксилане
1155	Асимметричные колебания связи С–О–С в целлюлозе
1047	Валентные колебания связи С–О в целлюлозе/гемицеллюлозе
897	Деформационные колебания связи С–Н в β -глюкозидных структурах

После щелочной обработки древесины на ИК-спектре наблюдается уширение полосы на 3422 см^{-1} , практически полное исчезновение полосы карбонильной группы на 1740 см^{-1} и уменьшение интенсивности полос на 1327 и 1236 см^{-1} , что свидетельствует о том, что щелочная обработка древесины избирательно разрушает гемицеллюлозу и в незначительной степени модифицирует лигнин, сохраняя структуру целлюлозы. Уширение полосы водородных связей при около 3400 см^{-1} указывает на то, что в обработанном образце появляется больше гидроксильных групп, что может повысить реакционную способность или доступность для дальнейшей химической модификации. Чувствительность полосы поглощения при 1740 см^{-1} к обработке древесины активирующим агентом позволила на основе анализа ее интенсивности выполнить исследование кинетики их взаимодействия.

На рис. 3 приведены ИК-спектры образцов древесины (опил дуба, фракция $0,5\text{--}3,0\text{ мм}$), обработанных гидроксидом натрия в течение 10, 20, 30, 60, 120 и 360 мин.

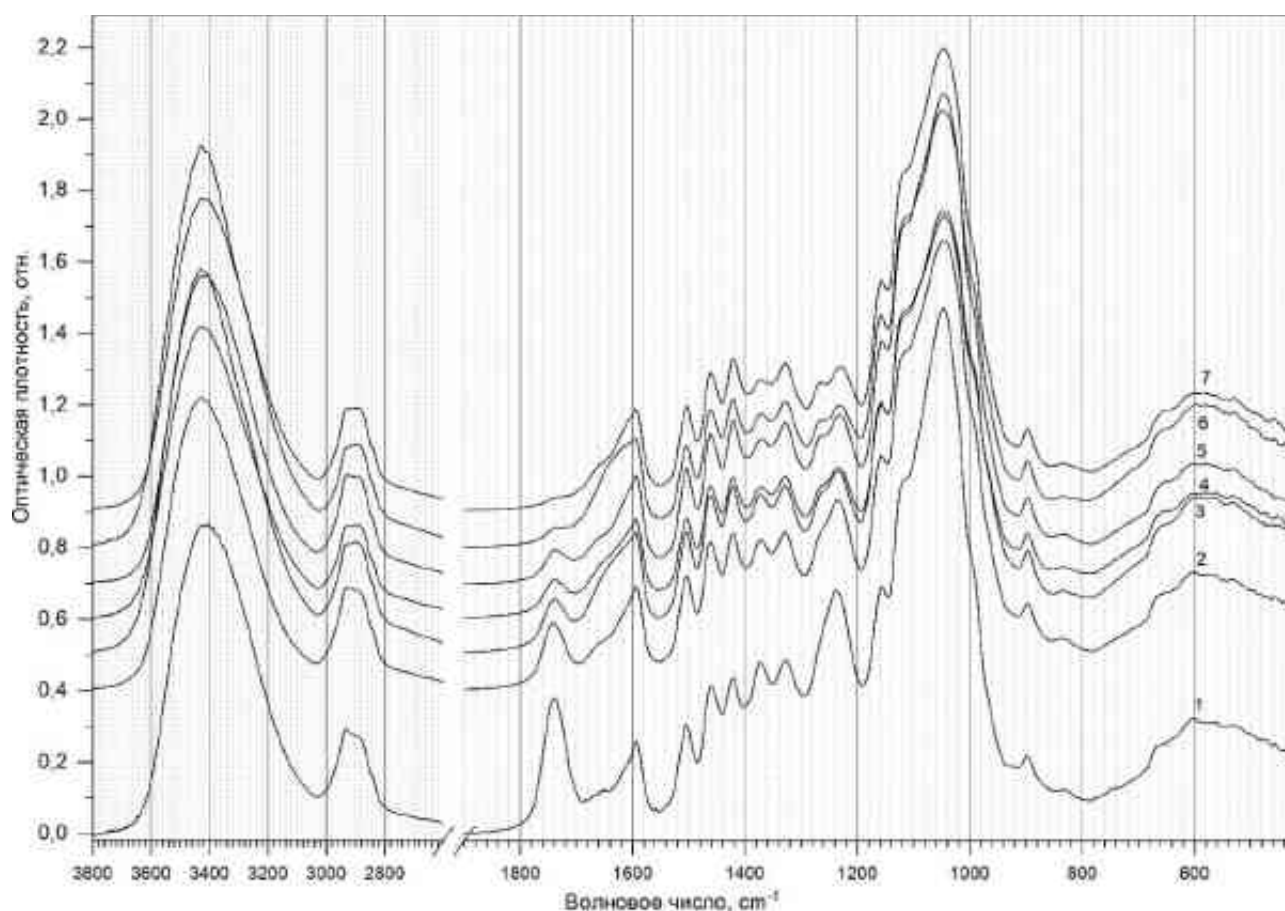


Рис. 3. ИК-спектры образцов древесины (опил дуба, фракция $0,5\text{--}3,0\text{ мм}$):
1 – исходный образец; 2–7 – образцы, обработанные гидроксидом натрия
в течение 10, 20, 30, 60, 120 и 360 мин соответственно

Fig. 3. IR spectra of wood samples (oak sawdust, $0.5\text{--}3.0\text{ mm}$ fraction):
1 – initial sample; 2–7 – treated with sodium hydroxide
during 10, 20, 30, 60, 120, and 360 min respectively

Как следует из рис. 3, интенсивность полосы поглощения карбонильной группы уменьшается со временем обработки.

Для количественной оценки степени взаимодействия натриевой щелочи с $C=O$ группами древесины рассчитано отношение интенсивности полосы на 1740 см^{-1} к внутреннему стандарту. В качестве внутреннего стандарта были выбраны полосы валентных колебаний $C-H$ связей в метиленовых и метильных группах компонентов древесины, проявляющихся в области $3100-2750\text{ см}^{-1}$. Интенсивность этих полос не изменяется в процессе обработки щелочью.

На рис. 4 приведена зависимость интенсивности полосы поглощения валентных колебаний $C=O$ от времени обработки. При данных условиях (фракция опила $0,5-3,0\text{ мм}$, соотношение компонентов $1:1$, температура проведения эксперимента $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) уже через 30 мин во взаимодействие со щелочью вступили около 80 % групп $C=O$. Через 2 ч количество непрореагировавших составляло менее 5 %.

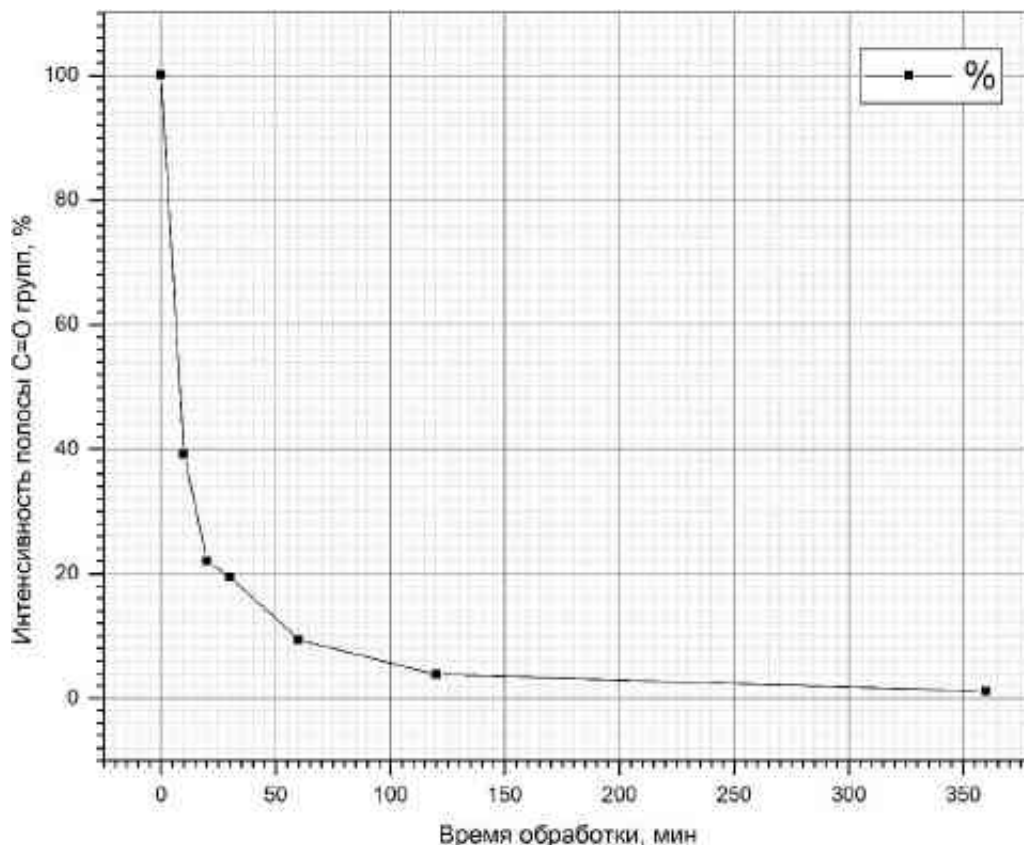


Рис. 4. Изменение интенсивности полосы поглощения $C=O$ групп от времени обработки гидроксидом натрия

Fig. 4. Change in the intensity of the absorption band of $C=O$ groups from the time of treatment with sodium hydroxide

Основываясь на полученных данных, оптимальным выбрано время в 30 мин, в течение которых вступало во взаимодействие с гидроксидом натрия около 80 % карбонильных групп.

На рис. 5 представлены результаты эксперимента, характеризующие адсорбционные свойства продуктов термоллиза модифицированных образцов древесины при температурах 400 и $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ эксперимента.

Анализ приведенных на рис. 5 данных свидетельствует о влиянии на адсорбционные свойства продуктов термоллиза количества модифицирующего агента и температуры термоллиза. При температуре термоллиза $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и соотношении компонентов $1:0,5$ адсорбционная активность по J_2 продуктов термоллиза невысока и практически не зависит от вида древесины около 31,0 % для твердолиственной и 34,2 % для погребенной. Повышение температуры термоллиза до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ на адсорбционную активность по йоду активированных углей из модифицированного березового опила и погребенной древесины также влияет незначительно, а для активированных углей из модифицированного дубового опила данный показатель увеличивается в 2,2 раза.

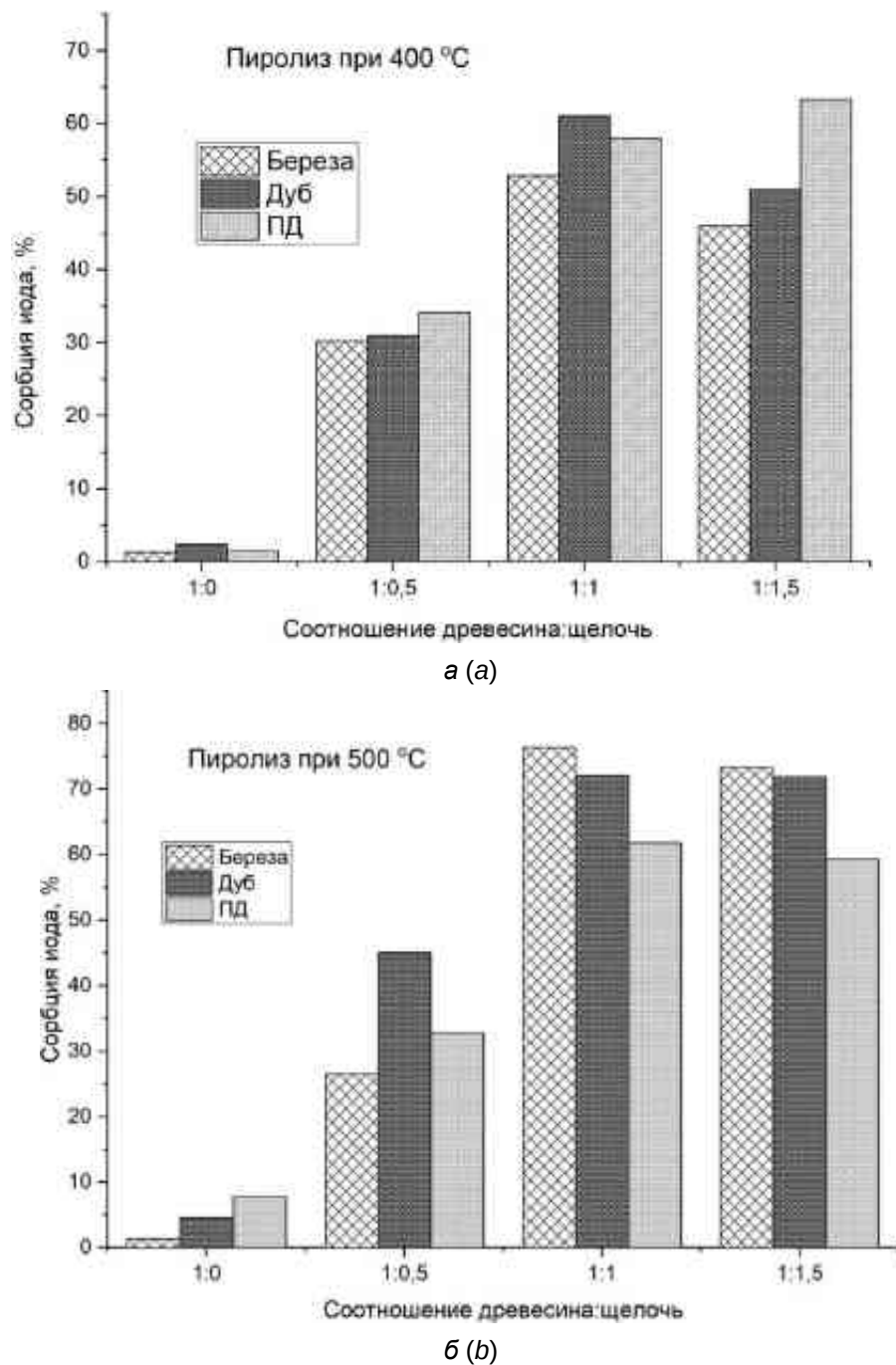


Рис. 5. Адсорбционные свойства продуктов термоллиза модифицированных образцов опилочной (а) и погребенной (б) древесины

Fig. 5. Adsorption properties of thermolysis products of modified sawdust (a) and buried (b) wood samples

Увеличение количества модифицирующего агента в 2 раза (соотношение 1 : 1) оказывает положительное влияние на адсорбционные свойства активированных углей, полученных из модифицированных образцов твердолиственной и погребенной древесины. Так, для активированных углей, полученных в результате термоллиза при 400 °C модифицированного березового, дубового опила и погребенной древесины увеличение количества гидроксида натрия в приводит к увеличению адсорбционной активности по йоду для активированных углей в 1,8; 2,0; 1,7 раза соответственно по сравнению адсорбционной активностью по йоду для активированных углей, полученных в результате термоллиза модифицированной древесины при соотношении компонентов 1 : 0,5. Данный показатель для активированных углей, полученных в результате термоллиза при температуре 500 °C модифицированного березового, дубового опила и погребенной древесины, увеличивается в 2,9; 1,1 и 1,9 раза соответственно.

Повышение количества модифицирующего агента в 3 раза (соотношение компонентов 1 : 1,5) приводит к росту микропор активированных углей, полученных в результате термоллиза при температуре 400 °С модифицированных образцов березового, дубового опила и погребенной древесины, увеличивает число микропор в 1,5; 1,6; 1,9 раза соответственно. При температуре термоллиза 500 °С увеличение количества модифицирующего агента повышает адсорбционную активность по йоду для углей из березового опила в 2,8 раза, углей из дубового опила – в 1,1, для углей из погребенной древесины – в 1,8 раза.

Анализ данных по адсорбционной активности по метиленовому голубому активированных углей, полученных в результате термоллиза модифицированных образцов опилочной и погребенной древесины, в условиях, приведенных выше, свидетельствует об образовании незначительного количества мезопор.

На основании анализа экспериментальных данных следует, что соотношение компонентов 1 : 1 при модифицировании гидроксидом натрия опилочной и погребенной древесины является оптимальным. Образуется активированный уголь с выходом 30–40 % и хорошо развитой микропористой структурой. Повышение температуры термоллиза от 400 до 500 °С оказывает незначительное влияние на адсорбционную активность по йоду образцов активированных углей, полученных из модифицированного древесного опила и погребенной древесины.

Модификация погребенной и опилочной древесины гидроксидом натрия при соотношении компонентов 1 : 1 позволяет получить при температуре термоллиза 400 и 500 °С активированный уголь с хорошо развитой системой микропор: адсорбционная активность по йоду составляет около 70 % и находится на уровне товарных аналогов.

Заключение. Методом ИК-спектроскопии показано, что в результате обработки модифицирующим агентом (гидроксид натрия) целлюлозосодержащего сырья (опил твердолиственных пород) и погребенной древесины наблюдаются уменьшение полос поглощения карбонильных групп в области 1740 см⁻¹ и увеличение интенсивности полос поглощения карбоксилат-ионов, свидетельствующее о взаимодействии иона натрия с Н-карбоксиметилем и Н-карбоксильными группами.

Исследована кинетика взаимодействия гидроксида натрия с активными группами древесины методом ИК-спектроскопии. На основе анализа интенсивности полосы поглощения при 1740 см⁻¹ установлена высокая скорость взаимодействия активирующего агента с исследуемыми образцами древесины: уже после 30-минутной обработки около 30 % активных групп вступает в реакцию взаимодействия.

Проведен термоллиз образцов опилочной и погребенной древесины, модифицированной гидроксидом натрия в соотношении компонентов 1 : 1; 1 : 0,5; 1 : 1,5, при температуре 400 и 500 °С. Установлено, что в результате термоллиза модифицированного растительного сырья (соотношение компонентов 1 : 1) при исследованных температурах образуется активированный уголь с хорошо развитой микропористой структурой. Адсорбционная активность по йоду находится на уровне товарных аналогов.

Список использованных источников

1. Петров, В. С. Технология сорбентов и других угольных материалов из отходов растительного происхождения / В. С. Петров, Ю. Я. Симкин, О. К. Крылова // Химия в интересах устойчивого развития. – 1996. – Т. 4, № 4–5. – С. 389–394.
2. Тюткова, Е. А. ИК-спектроскопия древесины индивидуальных годичных слоев / Е. А. Тюткова, С. Р. Лоскутов, Н. П. Шестаков // Хвойные бореальные леса. – 2017. – Т. XXXV, № 3–4. – С. 61–67.
3. Методы исследования древесины и ее производных: учебное пособие / Н. Г. Базарнова, Е. В. Карпова, И. Б. Катраков [и др.] / под ред. Н. Г. Базарновой. – Барнаул : Изд-во Алт. гос. ун-та. – 2002. – 160 с.

References

1. Petrov V. S., Simkin Yu. Ya., Krylova O. K. *Tekhnologiya sorbentov i drugih ugol'nyh materialov iz othodov rastitel'nogo proiskhozhdeniya* [Technology for producing sorbents and other carbonaceous materials from plant-based waste]. *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development], 1996, vol. 4, no. 4–5, pp. 389–394.
2. Tyut'kova E. A., Loskutov S. R., Shestakov N. P. *IK-spektroskopiya drevesiny individual'nyh godichnyh sloev* [IR spectroscopy of wood from individual annual rings]. *Hvojnye boreal'nye lesa* [Boreal coniferous forests], 2017, vol. XXXV, no. 3–4, pp. 61–67.
3. Bazarnova N. G., Karpova E. V., Katravov I. B., Markov V. I., Mikushina I. V., Olkhov Yu. A., Khudenko S. V. *Metody issledovaniya drevesiny i ee proizvodnyh: Uchebnoe posobie* [Methods for analyzing wood and wood-based materials: A study guide]. N. G. Bazarnova (ed.). Barnaul, Altai State University Press, 2002, 160 p.

Информация об авторах

Царюк Татьяна Яковлевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tsariuk9@mail.ru

Навоша Юльян Юльянович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Соколова Тамара Владимировна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Фалюшина Ирина Петровна – научный сотрудник Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Марзан Анастасия Сергеевна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: marr_29@mail.ru

Пехтерева Виктория Станиславовна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: pehvik@yandex.ru

Калантаров Михаил Георгиевич – кандидат биологических наук, ведущий инженер, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: mkalantaroff@gmail.com

Information about the authors

Tatiana Ya. Tsaryuk – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tsariuk9@mail.ru

Yulian Yu. Navoscha – Ph. D. (Physical and Mathematical), Leading Researcher, Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Tamara V. Sokolova – Ph. D. (Technical), Assistant Professor Senior Researcher Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Iryna P. Falyushyna – Researcher, Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Anastasiya S. Marzan – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: marr_29@mail.ru

Victoriya S. Pekhtereva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: pehvik@yandex.ru

Michail G. Kalantarov – Ph. D. (Biology), Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: mkalantaroff@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2026-1-239-247>
УДК 663.973+615.285

Поступила в редакцию 02.04.2026
Received 02.04.2026

БИОПРЕПАРАТ ИНСЕКТИЦИДНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ТАБАЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Н. А. Жмакова¹, Я. Э. Пилук², Н. Л. Макарова¹, Т. Н. Лукашевич²

¹Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

²РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию», Жодино, Беларусь

Аннотация. Предложен способ вовлечения неиспользуемых отходов табачных фабрик Беларуси – табачной пыли – в производство эффективного биопрепарата инсектицидного действия. Технология получения препарата заключается в химической переработке табачного сырья, при которой в раствор переходят биологически активные соединения, в том числе алкалоиды, и происходят вторичные химические процессы синтеза соединений меланоидиновой природы, обладающих ростстимулирующим действием. В полевых опытах установлена высокая биологическая эффективность препарата против рапсового цветоеда 69,2–70,7 % семенного скрытнохоботника – 52,6–82,1, семенного капустного комарика – 41,3–68,2 %. Его применение обеспечило увеличение урожайности маслосемян озимого рапса на 19,1–21,7 %, ярового – на 17,4–19,3, и повышение содержания в них масла на 1,1–2,4 %.

Ключевые слова: табачная пыль; биопрепарат «Кисет»; химический состав; биологическая эффективность; рапс; инсектицидная активность; урожайность.

Для цитирования. Жмакова Н. А., Пилук Я. Э., Макарова Н. Л., Лукашевич Т. Н. Биопрепарат инсектицидного действия на основе отходов табачного производства // Природопользование. – 2026. – № 1. – С. 239–247.

INSECTICIDAL BIOLOGICS BASED ON TOBACCO PRODUCTION WASTES

N. A. Zhmakova¹, Ya. E. Pilyuk², N. L. Makarova¹, T. N. Lukashevich²

¹Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

²RUE “Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture”, Zhodino, Belarus

Abstract. A method is proposed to involve unused waste of tobacco factories of Belarus - tobacco dust – in the production of an effective biological preparation of insecticidal action. The technology of preparation production consists in chemical processing of tobacco raw materials, during which biologically active compounds, including alkaloids, are transferred into the solution and secondary chemical processes of synthesis of melanoidin nature compounds with growth-stimulating effect take place. In field experiments high biological efficiency of the preparation against rapeseed flower-eater 69.2–70.7 % seed borer – 52.6–82.1, seed cabbage midge – 41.3–68.2 % was established. Its application provided an increase in oilseed yield of winter rape by 19.1–21.7 %, spring rape – by 17.4–19.3, and an increase in their oil content of 1.1–2.4 %.

Keywords: tobacco dust; biological preparation “Kiset”; chemical composition; biological efficacy; rapeseed, insecticidal activity; yield.

For citation. Zhmakova N. A., Pilyuk Ya. E., Makarova N. L., Lukashevich T. N. Insecticidal biologics based on tobacco production wastes. *Nature Management*, 2026, no 1, pp. 239–247.

Введение. В Республике Беларусь функционируют три промышленных предприятия по переработке табака, значительная часть которого при дроблении табачных листьев превращается в пылевидную фракцию, являющуюся отходом производства. Ежегодно ОАО «Гродненская табачная фабрика «Неман» перерабатывает 10 тыс. т табачного сырья, СП «Табак-инвест» – до 9 тыс., ОАО «Инвест Табакко» – более 1,6 тыс. т, значительная часть которого уходит в отходы в виде табачной пыли (около 1,2 тыс. т) и поступает на городские полигоны промышленных отходов. Таким образом, республика располагает значительными вторичными ресурсами табачного сырья, разработка эффективных технологий экологобезопасной бесполигонной утилизации которого является важной практической задачей.

Одним из направлений использования табачной пыли может стать создание на ее основе препаратов инсектицидного действия для защиты растений от вредителей. Использование в растениеводстве таких препаратов из сырья растительного происхождения в настоящее время является актуальной задачей в связи с высокой антропогенной нагрузкой химических средств защиты растений на агроэкосистемы.

Особенно острые экологические проблемы возникают при выращивании рапса, который в настоящее время является основной масличной культурой Беларуси. За последние годы посевные площади под ним увеличились в несколько раз, а урожайность семян возросла более чем на 50 %. При этом рапс, содержащий ценные питательные компоненты, такие как масло и белок, подвержен особенно сильному воздействию вредоносных насекомых, а на его защиту в Беларуси используется 60–70 % всех закупаемых инсектицидов [1]. К тому же рапс является пчелоопыляемой культурой и при его выращивании требуется защита опыляющих насекомых от негативного воздействия химических пестицидов. Применение для защиты рапса препаратов растительного происхождения может решить многие экологические проблемы.

Химический состав табачных листьев представлен органическими соединениями разных классов [2–5]. К ним относятся углеводы, азотистые соединения, в том числе белки и алкалоиды, органические кислоты, эфирные масла, смолы и др. Комплекс химических соединений табака характеризуется высоким содержанием веществ углеводного характера, массовая доля которых составляет 2,0–15,0 %, а в отдельных случаях и выше. Углеводы представлены моносахаридами (преимущественно глюкозой), ди-, три- и тетрасахарами, гемицеллюлозой, пектинами, целлюлозой.

В составе табака присутствуют азотсодержащие соединения – белки и полипептиды (в среднем их доля в табачном сырье составляет 5,0–13,0 %), амины, свободные аминокислоты, содержание которых сильно варьирует.

Растения табака содержат алкалоиды, обладающие инсектицидным действием, основными из которых являются никотин, анабазин и норникотин. При этом на долю никотина приходится 95–97 % всех алкалоидов табака. Массовая доля никотина в табачных листьях находится в пределах от 0,3 до 6,0 %. В составе табака присутствуют кислоты разных классов: летучие жирные, высшие жирные, ди- и трикарбоновые кислоты, альдегидо- и кетокислоты, фенолкарбоновые кислоты; их общее содержание составляет 5,0–17,0 %. Табак содержит также эфирные масла (0,09–1,37 %), смолы (2,0–17,0 %) и некоторые другие вещества в небольших количествах [2–5]. Химический состав табачной пыли аналогичен составу табачных листьев.

В Институте природопользования НАН Беларуси разработана технология получения биопрепарата «Кисет» путем химической переработки табачной пыли, при которой в раствор переходят не только алкалоиды, но и другие биологически активные соединения табака. В разработанной технологии параллельно процессу извлечения основных органических составляющих происходят вторичные реакции меланоидинообразования с получением жидкого препарата, обладающего сочетанным инсектицидным и ростстимулирующим действием.

Инсектицидная активность препарата обусловлена присутствием в его составе никотина, а действующими биологически активными веществами являются переходящие в раствор природные органические соединения табака, а также вещества меланоидиновой природы, образующиеся в результате вторичных реакций конденсации соединений, имеющих аминогруппу, в частности, аминокислот, с редуцирующими углеводами и карбонильными соединениями неуглеводного характера по реакции Майяра. Процесс имеет многоступенчатый характер и связан с образованием значительного количества азотсодержащих продуктов различной степени конденсации и растворимости. Конечным продуктом процесса являются меланоидины – темноокрашенные соединения с большой молекулярной массой, с различной степенью растворимости в воде и щелочах [6, 7]. Меланоидины являются предшественниками гуминовых веществ в процессе разложения растений в природной среде (торфообразование, почвообразование), а также образуются при переработке природного сырья и его составляющих в промышленных условиях (сахарное, кондитерское, консервное и другие производства). В соответствии с литературными данными меланоидины обладают высокой биологической активностью, а также мембранотропным действием, ускоряя поступление в клетку других соединений, т. е. в случае препарата из табачной пыли они могут усиливать действие никотина на вредителей [7].

Материалы и методы исследований. При исследовании физико-химических свойств цвет оценивали визуально, запах – органолептически, плотность измеряли ареометром, реакцию среды – при помощи иономера И-120.1, массовую долю сухих и органических веществ – весовым методом. Оптическую плотность 0,01%-ных растворов измеряли на спектрофотометре СпекордUV-vis при длине волны 465 нм.

Для количественного определения никотина использовали метод, основанный на его способности образовывать соли с кислотами [2]. Никотин извлекали методом экстракции смесью серного и петролейного эфиров (1 : 1). К эфирной фракции добавляли 50%-ный этиловый спирт и титровали 0,01 н. раствором серной кислоты в присутствии индикатора лакмоида.

Для определения содержания меланоидинов использовали метод осаждения безводным ацетоном [8]. Препарат предварительно диализовали против проточной воды до pH 8,0 а затем добавляли ацетон в соотношении 1 : 1. Полученную суспензию центрифугировали при 5000 об/мин, осадок промывали ацетоном, этанолом и высушивали при температуре 60 °С.

Выделение фракции свободных фенольных соединений проводили путем экстракции препарата диэтиловым эфиром с последующим растворением высушенного эфирного экстракта в 50%-ном этаноле. Суммарное содержание свободных фенольных соединений определяли по методике, основанной на их взаимодействии с реактивом Фолина – Дениса (смеси фосфомолибденовой и фосфовольфрамовой кислот) в присутствии углекислого натрия [9]. В результате реакции развивается синее окрашивание, основанное на образовании молибденовой и вольфрамовой сини. Оптическую плотность окрашенных растворов измеряли на спектрофотометре при 725–730 нм. Количество фенольных соединений определяли по калибровочной кривой, построенной по хлорогеновой кислоте.

Общее содержание карбоновых кислот определяли в пересчете на янтарную в растворе, прошедшем через колонку с ионообменной смолой КУ-I, его титрованием 0,05 н. раствором NaOH.

Агротехнические условия полевых опытов: почва дерново-подзолистая, супесь, содержание гумуса – 2,02 %, pH 6,0; содержание P_2O_5 – 186, K_2O – 225 мг/кг почвы; обработка почвы: вспашка на глубину 18–20 см, культивация, предпосевная обработка АКШ-3,6; внесение удобрений: $P_{60}K_{120}$ под вспашку. Азот – весной в два приема в дозе 120 + 30 кг/га; предшественник – многолетние травы. Норма высева семян: 1,5 млн всхожих семян на 1 га; способ сева: рядовой.

В полевых мелкоделяночных опытах площадь опытной делянки составляла 28,0 м², учетной – 20,0 м²; расположение делянок – рендомизированное, количество повторностей – 4. Норма расхода препарата – 4 л/га, рабочей жидкости – 200 л/га. Сроки применения препарата: в фазах начала бутонизации – ДК 51–53 (против имаго рапсового цветоеда) и стадии «желтый бутон» – ДК 57–59 (против имаго цветоеда, семенного скрытнохоботника). Технология и способ применения средства защиты растений – опрыскивание посевов.

Результаты и их обсуждение. Выполнена физико-химическая характеристика биопрепарата «Кисет» (табл. 1).

Таблица 1. Физико-химическая характеристика биопрепарата «Кисет»

Table 1. Physical and chemical characteristics of “Kiset” biologics

Цвет	Запах	Массовая доля, % в растворе			Оптическая плотность	Плотность, г/см ³	pH
		сухих веществ	органических веществ	зола			
Коричневый	Табака и щелочи	8,21	6,0	2,21	0,34	1,029	10,50

Кисет представляет собой однородную непрозрачную жидкость зеленовато-коричневого цвета, хорошо растворимую в воде, удельная плотность жидкого препарата составляет 1,029 г/см³, pH 10,5. Массовая доля сухих веществ – 82,1 г/л, органических веществ (ОВ) – 60,0 г/л.

В составе биопрепарата «Кисет» определено содержание основных групп биологически активных соединений (табл. 2).

Таблица 2. Содержание основных групп биологически активных соединений в биопрепарате «Кисет»

Table 2. Content of main groups of biologically active compounds in the “Kiset” biological product

Компоненты препарата	Содержание компонентов	
	в препарате, г/л	% на ОВ
Органические вещества	60,00	100,00
Минеральные вещества	22,10	–
Никотин	1,60	2,67
Меланоидины	38,46	64,10
Фенольные соединения	1,75	2,92
Органические кислоты	9,75	16,25

Основным соединением, ответственным за инсектицидную активность биопрепарата «Кисет», является алкалоид табака – никотин. По химическому строению никотин – азотсодержащее органическое вещество, у которого азот входит в состав двух связанных между собой гетероциклических ядер – пиридинового и пирролидинового. Азот, входящий в состав этих гетероциклических колец молекулы никотина, обуславливает основной характер алкалоида. По воздействию на живые организмы

никотин – алкалоид нервно-паралитического действия. Эти его свойства используются при борьбе с вредоносными насекомыми.

Содержание никотина в препарате «Кисет» – 1,60 г/л, или 2,67 % в пересчете на органическое вещество препарата.

Одним из важных компонентов препарата являются меланоидины. Установлено, что массовая доля меланоидинов в Кисете составляет 38,46 г/л, или 57,74 % от общего содержания органических веществ препарата. Меланоидины представляют собой твердое вещество темно-коричневой окраски без запаха. В соответствии с литературными данными структурная формула меланоидинов не установлена, эмпирическая – $(C_{31}H_{50}O_{22}N_2)_n$. Молекулярная масса составляет 600–650 а. е. Меланоидины растворимы в воде, их растворы стабильны в щелочной среде (8,0–14,0 единиц) и водных растворах при pH среды 7,0, в кислой среде при pH 3,0–5,0 выпадают в осадок [8].

Важную группу биологически активных веществ природного происхождения составляют соединения фенольного строения, которые являются конституционной частью многих растений и могут переходить в раствор при химическом воздействии, пополняя разнообразие биологически активных соединений этого класса в получаемом продукте. При этом в раствор могут переходить фенолкарбоновые кислоты, флавонолы, ароматические альдегиды, спирты и другие соединения, содержащиеся в исходном сырье. Многие из них могут проявлять защитные от болезней и вредителей свойства.

Установлено, что суммарное содержание свободных фенольных соединений в препарате из табачной пыли составляет 1,75 % от суммы органических веществ препарата (см. табл. 2).

Массовая доля органических кислот в растворе препарата «Кисет» составляет 9,75 г/л, или 16,25 % от суммы органических веществ.

Таким образом, исследование состава препарата «Кисет», полученного химической переработкой табачной пыли, выявило присутствие в нем значительных количеств никотина, обладающего инсектицидным действием, а также наличие других биологически активных веществ – низкомолекулярных карбоновых кислот, фенольных соединений, меланоидинов, обладающих мембранотропным действием. Комплекс этих соединений может не только усиливать инсектицидные свойства препаратов, но и оказывать ростстимулирующее действие на растения [8].

РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию» проведены двухлетние полевые регистрационные испытания препарата «Кисет» на яровом и озимом рапсе по защите от комплекса вредителей.

Показана эффективность использования биопрепарата «Кисет» против рапсового цветоеда в посевах ярового и озимого рапса (табл. 3).

Таблица 3. Биологическая эффективность биопрепарата «Кисет» против рапсового цветоеда в посевах ярового и озимого рапса

Table 3. Biological efficacy of the “Kiset” biologics against rapeseed flower beetle in spring and winter rapeseed crops

Вариант	Среднее число имаго на 1 растение, шт.				Биологическая эффективность по снижению численности, %		
	До обработки	После обработки, дни					
		3-й день	7-й день	10-й день	3-й день	7-й день	10-й день
Яровой рапс							
2022 г., фаза ДК 51–53							
Без обработки	2,0	2,10	2,50	2,06	–	–	–
Биопрепарат «Кисет»	2,0	0,52	0,89	1,06	75,2	65,4	48,5
2022 г., фаза ДК 57–59							
Без обработки	2,1	2,28	2,04	1,66	–	–	–
Биопрепарат «Кисет»	–	0,55	0,76	1,00	75,9	62,7	39,8
2023 г, фаза ДК 51–53							
Без обработки	2,8	3,20	3,80	4,20	–	–	–
Биопрепарат «Кисет»	3,0	1,02	1,80	2,38	68,1	52,6	43,3
2023 г., фаза ДК 57–59							
Без обработки	4,2	4,00	3,66	2,82	–	–	–
Биопрепарат «Кисет»	4,3	1,24	1,82	1,65	72,8	57,8	41,5

Окончание табл. 3

Вариант	Среднее число имаго на 1 растение, шт.				Биологическая эффективность по снижению численности, %		
	До обработки	После обработки, дни					
		3-й день	7-й день	10-й день	3-й день	7-й день	10-й день
Озимый рапс							
2022 г., фаза ДК 51–53							
Без обработки	2,3	3,16	2,55	2,00	–	–	–
Биопрепарат «Кисет»	2,1	1,10	1,35	1,20	65,2	47,1	40,0
2023 г., фаза ДК 51–53							
Без обработки	3,6	3,82	4,40	3,96	–	–	–
Биопрепарат «Кисет»	3,4	1,12	1,86	2,32	70,7	57,7	41,4
2023 г., фаза ДК 57–59							
Без обработки	3,6	3,22	2,88	2,40	–	–	–
Биопрепарат «Кисет»	3,6	0,98	1,35	1,44	69,6	53,1	40,0

При внесении в посевах ярового рапса в фазу начала бутонизации (ДК 51-53) препарата «Кисет» против рапсового цветоеда снижение численности имаго вредителя составило при учете на 3-й день 68,1–75,2 %, на 7-й день – 52,6–65,4, на 10-й день – 43,3–48,5 % по отношению к варианту без внесения инсектицида. При повторной обработке посевов ярового рапса в фазу конца бутонизации (ДК 57-59) биологическая эффективность составила на 3-й день после обработки – 72,8–75,9 %, на 7-й день – 57,8–62,7, на 10-й день – 39,8–41,5 %.

При внесении биопрепарата «Кисет» в посевах рапса озимого в фазу бутонизации в 2022 г., снижение численности имаго рапсового цветоеда составило при учете на 3-й день 65,2 %, на 7-й день – 47,1 и на 10-й день – 40,0 %, а в 2023 г – 70,7; 57,7 и 41,4 % соответственно.

Биопрепарат «Кисет» показал высокую биологическую эффективность против семенного скрытнохоботника на яровом и озимом рапсе (табл. 4).

Таблица 4. Биологическая эффективность биопрепарата «Кисет» против семенного рапсового скрытнохоботника в посевах ярового и озимого рапса

Table 4. Biological efficacy of “Kiset” biologics against seed rapeseed stealth harvester in spring and winter rapeseed crops

Вариант	Норма расхода, л/га	Среднее число имаго на 1 растение, шт.				БЭ по снижению численности, %		
		До обработки	После обработки					
			3-й день	7-й день	14-й день	3-й день	7-й день	14-й день
Яровой рапс								
2022 г.								
Без обработки	–	0,24	0,26	0,38	0,32	–	–	–
Биопрепарат «Кисет»	4,0	0,22	0,08	0,16	0,22	69,2	57,9	31,2
2023 г.								
Без обработки	–	0,28	0,34	0,36	0,28	–	–	–
Биопрепарат «Кисет»	4,0	0,32	0,10	0,16	0,18	70,6	55,6	35,7
Озимый рапс								
2022 г.								
Без обработки	–	0,28	0,28	0,32	0,42	–	–	–
Биопрепарат «Кисет»	4,0	0,30	0,05	0,14	0,26	82,1	56,2	38,1
2023 г.								
Без обработки	–	0,32	0,38	0,40	0,34	–	–	–
Биопрепарат «Кисет»	4,0	0,38	0,08	0,16	0,20	78,9	60,0	41,2

При учете на 3-й день после обработки биологическая эффективность на посевах ярового рапса составила 69,2–70,6 %, на 7-й день – 55,6–57,9 и на 14-й день – 31,2–35,7, а для озимого – 78,9–82,1; 56,2–60,0 и 38,1–41,2 % соответственно.

С целью борьбы со стручковым капустным комариком проведена обработка биопрепаратом «Кисет» посевов рапса в фазу середины цветения. В этот период вредитель начинает кладку яиц в молодые стручки рапса, а применение химических средств во время цветения запрещено. Учет поврежденных стручков проведен в фазу желто-зеленого стручка. Определена биологическая эффективность биопрепарата «Кисет» против стручкового капустного комарика в посевах ярового и озимого рапса (табл. 5).

Таблица 5. Биологическая эффективность биопрепарата «Кисет» против стручкового капустного комарика в посевах ярового и озимого рапса

Table 5. Biological efficacy of the “Kiset” biologics against green cabbage mosquito in spring and winter rapeseed crops

Вариант	Норма расхода, л/га	Число имаго до обработки, шт/растение	Число поврежденных стручков на 100 просмотренных, шт.	Снижение поврежденности к варианту без обработки, %
Яровой рапс				
<i>2022 г.</i>				
Без обработки	–	1,4	10,8	–
Биопрепарат «Кисет»	4,0	1,5	5,0	53,7
<i>2023 г.</i>				
Без обработки	–	1,0	8,8	–
Биопрепарат «Кисет»	4,0	1,1	3,8	56,8
Озимый рапс				
<i>2022 г.</i>				
Без обработки	–	1,2	13,8	–
Биопрепарат «Кисет»	4,0	1,2	8,1	41,3
<i>2023 г.</i>				
Без обработки	–	1,6	18,9	–
Биопрепарат «Кисет»	4,0	1,4	6,0	68,2

Результаты исследований показывают, что число поврежденных личинками капустного комарика стручков ярового рапса сократилось на 53,7–56,8 % к контролю, озимого – на 41,3–68,2 %.

Применение биопрепарат «Кисет» показало высокую хозяйственную эффективность, способствуя улучшению структуры урожая ярового и озимого рапса и повышению урожайности маслосемян (табл. 6 и 7).

Таблица 6. Влияние биопрепарата «Кисет» на элементы структуры урожая ярового и озимого рапса

Table 6. Impact of “Kiset” biologics on spring and winter rapeseed crop structure elements

Вариант	Число стручков, шт.			Число семян в стручке, шт.	Масса 1000 семян, г
	центральная кисть	боковые ветви	всего на растении		
Яровой рапс					
2022 г.					
Без обработки	34	92	126	23,0	4,19
Биопрепарат Кисет	37	112	149	24,8	4,33
НСР _{0,5}	1,08	6,02	5,38	1,18	0,04
2023 г.					
Без обработки	22	100	122	22,5	3,68
Биопрепарат Кисет	26	119	145	23,8	3,82
НСР _{0,5}	0,4	4,8	5,2	0,4	0,06

Окончание табл. 6

Вариант	Число стручков, шт.			Число семян в стручке, шт.	Масса 1000 семян, г
	центральная кисть	боковые ветви	всего на растении		
Озимый рапс					
2022 г.					
Без обработки	31	118	149	25,9	4,47
Биопрепарат Кисет	34	138	172	27,8	4,66
НСР _{0,5}	1,12	5,58	6,40	1,15	0,06
2023 г.					
Без обработки	25	115	140	21,8	5,70
Биопрепарат Кисет	30	155	185	23,0	5,99
НСР _{0,5}	1,40	6,42	8,5	1,20	0,05

Таблица 7. Влияние биопрепарата «Кисет» на урожайность маслосемян рапса

Table 7. Impact of “Kiset” biologics on the yield of rapeseed oilseeds

Вариант	Урожайность, ц/га		Прибавка к контрольному варианту			
			ц/га		%	
	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.
Яровой рапс						
Без обработки	22,8	25,8	–	–	–	–
Биопрепарат Кисет	27,2	30,3	4,4	4,5	19,3	17,4
НСР _{0,5}	1,55	1,42	–	–	–	–
Озимый рапс						
Без обработки	31,4	27,7	–	–	–	–
Биопрепарат Кисет	38,2	33,0	6,8	5,3	21,7	19,1
НСР _{0,5}	1,82	1,76	–	–	–	–

Кисет оказал положительное влияние на элементы структуры урожая ярового и озимого рапса. При его применении на яровом рапсе число стручков на растении увеличилось на 18,2–18,8 %, число семян в стручке – на 5,8–7,8, масса 1000 семян – на 3,3–3,8 % по отношению к контрольному варианту. Для озимого рапса эти показатели составили 15,4–32,1; 5,5–7,3 и 4,2–5,1 % соответственно.

Применение биопрепарата «Кисет» обеспечило увеличение урожайности маслосемян озимого рапса на 19,1–21,7 ц/га, а ярового – 17,4–19,3 ц/га.

Оценка качества продукции показала, положительное влияние биопрепарата «Кисет» на состав маслосемян рапса (табл. 8.)

Таблица 8. Влияние биопрепарата «Кисет» на химический состав семян рапса

Table 8. Impact of “Kiset” biologics on rapeseed chemistry

Вариант	Содержание, %					
	сырого жира		сырого белка		глюкозинолатов	
	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.
Яровой рапс						
Без обработки	40,6	39,0	22,6	25,9	0,50	0,56
Биопрепарат «Кисет»	41,6	41,4	21,9	25,5	0,42	0,55
НСР _{0,5}	0,06	0,06	0,06	0,07	0,04	0,03
Озимый рапс						
Без обработки	41,3	44,3	23,1	21,7	0,56	0,64
Биопрепарат «Кисет»	43,1	45,4	23,2	21,6	0,54	0,63
НСР _{0,5}	0,14	0,16	0,05	0,08	0,03	0,01

Применение биопрепарата «Кисет» способствует повышению содержания масла в семенах рапса озимого на 1,1–1,8 %, или на 2,5–4,4 % (в относительном выражении), рапса ярового – на 1,0–2,4 %, или на 2,5–6,2 % (в относительном выражении) по сравнению с контрольным вариантом и не повышает содержание глюкозинолатов, негативно воздействующих на организм человека и животных.

Биопрепарат «Кисет» прошел государственную регистрацию, включен в «Государственный реестр средств защиты растений (пестицидов) и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь» и выпускается на одном из предприятий Республики Беларусь.

Заключение. Таким образом, на основе неиспользуемого отхода табачного производства разработана технология получения биопрепарата инсектицидного действия «Кисет», который защищает растения ярового и озимого рапса от комплекса вредителей, положительно влияет на урожайность и качество получаемой продукции и не оказывает негативного воздействия на окружающую среду.

Список использованных источников

1. Пиллюк, Я. Э. Рапс в Беларуси: (биология, селекция и технология возделывания) / Я. Э. Пиллюк. – Мн. : Бизнес-офсет, 2007. – 240 с.
2. Машковцев, М. Ф. Химия табака / М. Ф. Машковцев. – М. : Пищевая промышленность, 1971. – 272 с.
3. Писклов, В. П., Сравнительный анализ химического состава табачного сырья / В. П. Писклов, С. К. Кочеткова, Н. А. Дурунга // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – Краснодар, 2012. – № 5–6. – С. 20–24.
4. Дон, Т. А. Исследование некурительной никотинсодержащей продукции / Т. А. Дон, А. Г. Миргородская, М. В. Шкидюк // Новые технологии. – Краснодар, 2019. – Вып. 2 (48). – С. 40–45.
5. Плотника, Т. В. Применение отходов табачного производства в качестве средства защиты сельскохозяйственных культур от вредителей / Т. В. Плотника, А. Д. Миргородская, Г. П. Шураева // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 5 (56). – С. 153–158.
6. Lund, M. N. Control of Maillard reactions in foods: strategies and chemical mechanisms / M. N. Lund, C. A. Ray // J. Agric. Food Chem. – 2017. – Vol. 65, № 23. – P. 4537–4552.
7. Дамберг, Б. Э. Реакция меланоидинообразования и ее биологическое значение / Б. Э. Дамберг // Известия АН Латвийской ССР. – 1976. – Т. 1. – С. 97–105.
8. Бугаенко, И. Ф. Свойства красящих веществ сахарного производства и методы их удаления / И. Ф. Бугаенко, И. П. Славгородская. – М. : ЦНИИТЭИ пищепром, 1972. – 215 с.
9. Методы биохимического исследования растений / под ред. А. И. Ермакова. – Л. : Агропромиздат, 1987. – С. 112–113.

References

1. Pilyuk Y. A. *Raps v Belarusi (biologiya, selekciya i tekhnologiya vozdel'nyaniya)*. [Rapeseed in Belarus: (biology, selection and cultivation technology)]. Minsk, Biznesofset Publ., 2007, 240 p. (in Russian)
2. Mashkovcev M. F. *Himiya tabaka* [Chemistry of tobacco]. Moscow, Food Industry publ., 1971, 272 p. (in Russian)
3. Pisklov V. P., Kochetkova S. K., Durunga N. A. *Sravnitel'nyj analiz himicheskogo sostava tabachnogo syr'ya* [Comparative analysis of the chemical composition of tobacco raw materials]. *Izvestiya VUZov. Pishchevaya tekhnologiya = News of Higher Education Institutions. Food technology*. Krasnodar, 2012, no. 5–6, pp. 20–24. (in Russian)
4. Don T. A., Mirgorodskaya A. G., Shkidyuk M. V. *Issledovanie nekuritel'noy nikotinsoderzhashei productsii* [Research of non-smoking nicotine-containing products]. *Novye tekhnologii = New Technologies*. Krasnodar, 2019, vol. 2 (48), pp. 40–45. (in Russian)
5. Plotnika T. V., Mirgorodskaya A. D., Shuraeva G. P. *Primenenie othodov tabachnogo proizvodstva v kachestve sredstva zashchity sel'skohozyajstvennykh kul'tur ot vreditel'ej* [Application of tobacco production waste as a means of crop protection from pests]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Proceedings of Kuban State Agrarian University*, 2015, no. 5 (56), pp.153–158. (In Russian)
6. Lund M. N., Ray C. A. Control of Maillard reactions in foods: strategies and chemical mechanisms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, vol. 65, no. 23, pp. 4537–4552.
7. Damberg B. E. *Reakciya melanoidinoobrazovaniya i ee biologicheskoe znachenie* [Melanoidin formation reaction and its biological significance]. *Izvestiya AN Latvijas SSR = News of the Academy of Sciences of the Latvian SSR*, 1976, vol. 1, pp. 97–105. (in Russian)
8. Bugaenko I. F., Slavgorodskaya I. P. *Svoystva krasyashchih veshchestv saharnogo proizvodstva i metody ih udaleniya* [Properties of coloring substances of sugar production and methods of their removal]. Moscow: TsNIITEI Pischeprom Publ., 1972, 215 p. (in Russian)
9. *Metody biohimicheskogo issledovaniya rastenij* [Methods of biochemical study of plants]. Ed. by A. I. Ermakov. Leningrad, 1987, pp. 112–113. (in Russian)

Информация об авторах

Жмакова Надежда Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: zhmakova@mail.ru

Пилук Ядвига Эдвардовна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующая отделом масличных культур, РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию», (ул. Тимирязева, 1, 222160, г. Жодино, Минская область, Беларусь). E-mail: iveya@list.ru

Макарова Наталья Леонидовна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Лукашевич Татьяна Николаевна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию», (ул. Тимирязева, 1, 222160, г. Жодино, Минская область, Беларусь). E-mail: npz@izis.by

Information about the authors

Nadezhda A. Zhmakova – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhmakova@mail.ru

Yadviga E. Pilyuk – D. Sc. (Agricultural), Professor, Head. Department of oilseeds, RUE “Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture” (1, Timiryazeva St., 222160, Zhodino, Minsk region, Belarus). E-mail: iveya@list.ru

Natalya L. Makarova – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny St., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Tatyana N. Lukashevich – Ph. D. (Agricultural), Senior Researcher RUE “Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture” (1, Timiryazeva St., 222160, Zhodino, Minsk region, Belarus). E-mail: npz@izis.by

ПАМЯТИ УЧЕНОГО *IN THE MEMORY OF A SCIENTIST*

ПАМЯТИ АНАТОЛИЯ ВИКТОРОВИЧА КУДЕЛЬСКОГО (16.09.1934–10.01.2026) *IN THE MEMORY OF ANATOLIY VIKTOROVICH KUDELSKIY (16.09.1934–10.01.2026)*



10 января 2026 г. ушел из жизни лауреат Государственной премии Республики Беларусь (1998), доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси Анатолий Викторович Кудельский – известный гидрогеолог, крупный специалист в области региональной и нефтегазовой гидрогеологии, геохимии подземных вод и экологии.

Закончив в 1958 г. Днепропетровский горный институт и получив специальность горного инженера-гидрогеолога, А. В. Кудельский в течение 10 лет работал в Туркмении, в Южно-Каракумской геологической экспедиции, где занимался изучением подземных вод горно-пустынных территорий Копет-Дага и прилегающих районов Кара-Кумов по программе гидрогеологических съемок масштабов 1 : 200 000 и 1 : 100 000. Составленные им гидрогеологические карты Западного Копет-Дага сыграли важную роль в изучении и экономическом развитии Восточного Закаспия.

Мелиоративная гидрогеология, гидрогеология горных стран, сельскохозяйственное и коммунальное водоснабжение, формирование пресных и минеральных вод, роль подземных вод в об-

разовании нефти и газа, рудных и нерудных полезных ископаемых – вот далеко не полный перечень исследований Анатолия Викторовича в Туркмении.

В этот же период А. В. Кудельский развивал концепцию гидродинамической автономности горно-складчатых сооружений относительно смежных с ними межгорных и предгорных депрессий, основанную на идеях Н. Н. Игнатовича и А. М. Овчинникова. В работах Анатолия Викторовича концепция приобрела контуры и глубину теории, сыгравшей важную роль в пересмотре постулата региональной гидрогеологии, касающегося распределения областей питания и разгрузки водоносных горизонтов и комплексов по профилю горно-складчатые сооружения – предгорные прогибы.

С 1968 г. научная и научно-производственная деятельность А. В. Кудельского была неразрывно связана с Беларусью, куда он переехал по приглашению академиков Г. В. Богомолова и К. И. Лукашева. Первоначально в составе Геохимической лаборатории АН БССР, а с 1971 г. в составе академического Института геохимии и геофизики Анатолий Викторович занимался изучением региональной гидрогеологии страны, геохимии и динамики подземных вод и рассолов, минеральных вод и газового режима Припятского нефтегазоносного бассейна, активно оппонировал гидрогеологически не обоснованным широкомасштабным осушительным мелиорациям Полесья.

По каждому из этих направлений А. В. Кудельским и под его руководством были созданы крупные монографические обобщения, содержащие как фундаментальные разработки, так и огромные массивы результатов многолетних исследований геологической службы Беларуси, самого автора и его коллег.

Огромное внимание Анатолий Викторович уделял изучению региональной гидрогеологии и пресных подземных вод – основного источника хозяйственно-питьевого обеспечения Беларуси. Им и его сотрудниками создана база данных по химическому составу подземных вод, разработана стратегия сохранения их высокого качества, впервые составлены среднемасштабные гидрогеохимические карты четвертичных и дочетвертичных отложений Беларуси. Исследования А. В. Кудельского по гидрогеологии Беларуси в части полученных результатов по пресным, минерализованным водам, рассолам, в том числе по йодо-бромной тематике, гидрогеохимическим критериям оценки перспектив нефтегазоносности, газовому режиму девонских отложений Припятского прогиба и другие реализованные им задачи явились надежной основой для исследования недр Беларуси в текущем и перспективном направлении.

Фундаментальные научные исследования Анатолия Викторовича органически сочетались с практическим применением их результатов в соответствии с запросами народно-хозяйственного комплекса страны. Им и его коллегами активно внедрялась в производство научно обоснованная концепция подземного захоронения жидких и вязко-пластичных отходов буровых работ в Припятском прогибе; разрабатывалась методика и в течение многих лет проводился экологический мониторинг на подземных газовых хранилищах Беларуси.

После катастрофы на Чернобыльской АЭС А. В. Кудельский и сотрудники возглавляемой им лаборатории гидрогеологии занимались проблемами радиоэкологии, миграции радионуклидов и радиационного состояния поверхностных и подземных вод загрязненных территорий юго-восточной Беларуси. Начиная с 1993 г. и в последующие годы Анатолий Викторович активно сотрудничал с учеными Великобритании, Италии, Германии, Португалии, Нидерландов, Франции, Украины и России, являясь научным руководителем и координатором белорусской части международных проектов, касающихся миграции и моделирования поведения радионуклидов в почвенном субстрате и водных экосистемах в связи с аварией на Чернобыльской АЭС.

Научные разработки А. В. Кудельского по чернобыльской проблеме радиоэкологии находят реализацию и в настоящее время, о чем свидетельствует программа международной научной конференции «Чернобыль: 40 лет спустя» (г. Гомель, 23–24 апреля 2026 г.), посвященной 40-й годовщине катастрофы на Чернобыльской АЭС.

В 1993–1997 гг. Анатолий Викторович представлял Беларусь в международных разработках по проекту Pilot-study NATO/NACC/CCMS «Cross-border Environmental problems emanating defence-related installations and activities» и участвовал в выездных совещаниях: в Германии (1993), Турции (1994), Франции (1994), Италии (1996), Исландии (1996), Великобритании (1997) и Польше (1997).

Результаты исследований по данному проекту позволили оценить масштабы экологических разрушений в результате двух мировых войн, характер и объем загрязнения на территории бывших военных баз, ставить и решать (Германия и другие страны) проблему регламентации экологического ущерба от деятельности военных формирований в мирное время и необходимости работ над проектом Международной концепции научно-экологического регулирования военной деятельности в эти же периоды.

В 2005 г. А. В. Кудельский представлял Республику Беларусь в качестве эксперта-наблюдателя в работе выездной миссии МАГАТЭ по обсуждению проекта наземного хранилища радиоактивных отходов Игналинской АЭС (Вильнюс-Игналина, Литва). Показательный пример опережающих гидрогеологических исследований ученых возглавляемой Анатолием Викторовичем лаборатории в районах строительства особо важных инженерных объектов хорошо просматривается при сооружении Белорусской АЭС на территории Островецкого региона. Детальный анализ и открытое обсуждение проблемы в дальнейшем оказались полезными при подготовке и проведении им и его сотрудниками гидрогеологических исследований в пределах Островецкой площадки планируемой для строительства Белорусской АЭС (2009 г.) и последующих научно-прикладных исследований, реализуемых в настоящий период (2024–2026 гг.) для выбора площадок под проектирование пунктов захоронения радиоактивных отходов.

Профилирующая тематика в исследованиях А. В. Кудельского и сотрудников возглавляемой им лаборатории гидрогеологии и гидроэкологии постоянно ориентирована на изучение региональной гидрогеологии Беларуси, происхождения и геохимии пресных подземных вод питьевого регистра.

Значительный интерес мировой геологической общественности вызвали экспертные оценки Анатолия Викторовича в отношении природы ажиотажа вокруг проблемы сланцевого газа. В результате геолого-геохимических исследований ученый пришел к заключению, что мировой газосланцевый бум не имеет под собой оснований, а высокий прирост газодобычи в США в последние годы связан не с эксплуатацией так называемых месторождений сланцевого газа, а с освоением ранее законсервированных месторождений свободного газа и (или) с перехватом газопотоков из глубоководных зон современного нефтегазообразования и нефтегазовых залежей.

За исследование проблем нефтегазоносности верхнепротерозойских и палеозойских комплексов Беларуси и Сибири А. В. Кудельскому вместе с группой белорусских и российских ученых присуждена Межакадемическая (НАН Беларуси и СО РАН) премия имени академика В. Н. Коптюга (2004).

Повышенное внимание ученый уделял развитию гидрогеологии в Беларуси и подготовке научных кадров. На протяжении ряда лет он читал лекции в Гомельском и Белорусском государственном университетах, Белорусском национальном техническом университете и других учреждениях высшего образования. Анатолием Викторовичем подготовлено 11 кандидатов наук. Неизменно благожелательную и активную позицию он занимал при подготовке докторских и кандидатских диссертаций коллегами.

Профессор А. В. Кудельский – талантливый пропагандист и популяризатор научных знаний. Его научно-популярные книги «Новеллы о воде» (1973), «Рассказы о воде: белорусские криницы» (1981), «Вода жизни нашей» (1992), а также социально-экологическая постчернобыльская публицистика (в журналах «Неман», «Полымя», «Беларуская думка» и других изданиях, 1990–2003) завоевали признание широкой аудитории читателей, сыграли значительную роль в формировании общественного самосознания и несомненно способствовали росту популярности страны на международной арене.

Анатолий Викторович является автором более 530 опубликованных работ, в том числе 25 монографий и книг.

Широта мышления, эрудиция, увлеченность наукой, способность видеть главное в сложных научных проблемах и принципиальность привлекали к А. В. Кудельскому творческих людей. Его отличали оптимизм, доброжелательность и внимание к коллегам, готовность поддержать новые идеи и преданных этим идеям ученых. Жизнелюбие и юмор сочетались в нем с редкой трудоспособностью и высокими человеческими качествами. Анатолий Викторович по праву являлся лидером белорусской геолого-гидрогеологической науки с широкой известностью и заслуженным авторитетом, как в нашей стране, так и далеко за ее пределами.

Выражаем глубокие соболезнования семье Анатолия Викторовича. В памяти многочисленных коллег и учеников А. В. Кудельский навсегда останется примером талантливого многогранного ученого – исследователя недр, доброжелательным и отзывчивым человеком и великим тружеником.

***С. А. Лысенко, А. А. Махнач, Я. Г. Грибик,
Г. А. Камышенко, В. Г. Жогло, В. И. Пашкевич,
Н. М. Томина, Е. А. Кухарик, В. С. Хомич***

ПАМЯТИ БОРИСА ВАЛЕНТИНОВИЧА КУРЗО
(28.10.1949–11.02.2026)
IN MEMORY OF BORIS VALENTINOVICH KURZO
(28.10.1949–11.02.2026)



11 февраля 2026 г. ушел из жизни известный ученый в области изучения и использования сапропеля, заведующий лабораторией использования и охраны торфяных и сапропелевых месторождений Института природопользования НАН Беларуси, доктор технических наук, доцент Борис Валентинович Курзо.

Борис Валентинович родился 28 октября 1949 г. в г. Минске, в семье служащих. Детство его прошло в г. Слониме Гродненской области. После окончания школы в 1967 г. Б. В. Курзо поступил на геолого-географический факультет Белорусского государственного университета имени В. И. Ленина, который успешно закончил в 1972 г. Интерес к водным объектам и озерным отложениям ему привила легендарный ученый-озеровед, профессор О. Ф. Якушко.

В 1976 г. Борис Валентинович стал работать в Институте торфа, который впоследствии был преобразован в Институт проблем использования природных ресурсов и экологии, а позже – в Институт природопользования НАН Беларуси. В 1976 г. Б. В. Курзо поступил в целевую аспирантуру Калининского политехнического института (теперь – Тверской государственный технический уни-

верситет), где под руководством профессора И. Ф. Ларгина – очень авторитетного ученого в области геологии торфяных месторождений, сформировался его научный фундамент. После окончания аспирантуры с 1981 г. работал младшим научным сотрудником лаборатории генезиса торфяных и сапропелевых месторождений Института торфа АН БССР, которую впоследствии и возглавил. Итогом первоначального этапа научной деятельности Бориса Валентиновича стала защита им в 1982 г. кандидатской диссертации на тему «Условия формирования, состав и геологическая оценка запасов сапропелей краевой зоны Валдайского оледенения».

Б. В. Курзо принимал активное участие во многих экспедициях по оценке ресурсного потенциала залежей сапропеля белорусских озер. Под его руководством и при непосредственном участии разведано 661 из 1900 белорусских озер ледникового происхождения. Эти колоссальные данные легли в основу Кадастров сапропелевых отложений по административным областям Беларуси, а впоследствии и их современного электронного варианта, которые выполнены под руководством Бориса Валентиновича. До сих пор не утратила актуальность и очень востребована среди изучающих сапропель написанная в 1989 г. Б. В. Курзо совместно с С. В. Богдановым монография «Генезис и ресурсы сапропелей Беларуси».

Борис Валентинович является соавтором промышленно-генетической классификации сапропеля. В настоящее время она оформлена в виде национального стандарта Беларуси СТБ 17.04.02-01-2010.

В конце 1980-х – начале 1990-х годов появился цикл работ ученого, посвященный радиационному загрязнению сапропелевых месторождений в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Борис Валентинович неоднократно бывал в зонах обязательного отселения, где активность по цезию-137 в десятки раз превышала предельно допустимые значения. Б. В. Курзо – ликвидатор аварии на ЧАЭС.

Дальнейшие исследования озерного осадконакопления в середине 1990-х годов Бориса Валентиновича совместно с коллегами А. Л. Жуховицкой, Б. П. Власовым, В. А. Кузнецовым и В. П. Зерницкой были направлены на изучение седиментогенеза и стратиграфии отложений. Ученые рассматривали озера не только как аккумуляторы органического вещества, но и как накопители и хранители истории развития озер и озерного водосбора, климата и биологического разнообразия в последниковый период. Результатом этих исследований явились монографии «Озерный седиментогенез в голоцене Беларуси: генетические и биологические аспекты» и «Озеро Долгое (седиментогенез, стратиграфия донных отложений и этапы развития».

Итогами большой работы в области ресурсов сапропеля стали серии карт и диаграмм в фундаментальных и престижных изданиях Национального атласа Беларуси.

В начале 2000-х годов Б. В. Курзо инициировал исследования по запасам сапропеля, залегающего под слоем торфа. По его расчетам, примерно каждое третье торфяное месторождение в Беларуси подстилается сапропелем. Для понимания общих закономерностей формирования ученым был

выполнен анализ и обобщен большой фактический материал по генезису, стратиграфии и геохимии озерных отложений в различных природных условиях Беларуси, что позволило всесторонне охарактеризовать эволюцию разнотипных месторождений сапропеля, разработать научно обоснованную генетическую классификацию залежей и выполнить районирование территории республики по вещественно-генетическим типам озерного осадконакопления.

Итогом работ по генезису и рациональному использованию ресурсов сапропеля стала монография «Закономерности формирования и проблемы использования сапропеля» и защита в 2007 г. диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Горно-геологические условия формирования месторождений сапропеля, экологобезопасные технологии их разработки и комплексное использование сапропелевых ресурсов Беларуси».

По результатам выполненных Борисом Валентиновичем научно-прикладных работ организована добыча сапропелевых лечебных грязей, сырья для производства кормовых добавок, сапропелевых удобрений и буровых растворов на озерах Червоное Житковичского района, Святое Рогачёвского района, Великое Мозырского района, Судобль Смолевичского района, Лочинское Осиповичского района и многих других объектах.

Под руководством Б. В. Курзо в Лельчицком районе Гомельской области проведены изыскания на месторождении сапропеля «Прибыловичи». При использовании сырья месторождения в ОАО «Лельчицкий агросервис» внедрена технология производства сапропелевой кормовой добавки и введен в эксплуатацию цех производительностью 10 тыс. т в год.

В последние годы под руководством Бориса Валентиновича предложена научно обоснована технология скважинной добычи сапропеля из-под торфа. Разработаны теоретические основы ее расчета, определены технические характеристики оборудования, произведен монтаж опытной установки. Экспериментальные исследования показывают возможность создания на ее основе малотоннажной технологии добычи озерного сапропеля и сапропеля из-под торфа.

Борис Валентинович являлся членом совета по защите диссертаций по специальности Д 01.23.01, а также Республиканской комиссии по запасам полезных ископаемых Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь.

Результаты научной деятельности Б. В. Курзо представлены в 266 научных работах, в том числе в 6 монографиях, которые опубликованы в Беларуси, а также в ближнем (Польша, Литва, Россия) и дальнем (Япония) зарубежье.

В 2012 г. Борис Валентинович награжден Почетной грамотой НАН Беларуси, в 2015 г. – Почетным знаком «У гонар заснавання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі».

Свойственные Б. В. Курзо глубокая эрудиция, целеустремленность, энергичность, интеллигентность и высокая работоспособность позволили ему стать лидером в области изучения сапропеля. Для всех, кто сталкивался с вопросами генезиса, ресурсов, использования этого уникального полезного ископаемого, Борис Валентинович был главным авторитетом и хранителем знаний о богатстве белорусских озер.

Б. В. Курзо обладал высокими личностными качествами. Его ответственность, искренность, скромность, доброжелательность всегда привлекали к нему коллег и друзей. Светлая память о большом ученом и замечательном человеке Борисе Валентиновиче Курзо навсегда останется в сердцах всех, кому довелось с ним общаться и работать.

***Редколлегия журнала «Природопользование»,
коллектив лаборатории использования и охраны
торфяных и сапропелевых месторождений
Института природопользования НАН Беларуси,
друзья, коллеги***

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

При написании и оформлении статей авторам необходимо руководствоваться приведёнными ниже правилами.

I. Статья о результатах работ, проведённых в научных учреждениях, должна иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции соответствующего института либо выписку из протокола заседания учёного совета, отдела или кафедры, а также акт экспертизы).

II. Статью нужно представлять в редакцию на белорусском, русском или английском языках.

Она должна иметь следующую структуру:

1. Параметры страницы – формат A4; поля – верхнее и нижнее по 2,5 см, левое и правое по 2 см;
 - источник бумаги: различать колонтитулы чётных и нечётных страниц; расстояние до верхнего колонтитула – 2,0 см; до нижнего колонтитула – 1,8 см;
 - межстрочный интервал – одинарный;
 - абзацный отступ – 10 мм.

2. Текст набирают в Word под Windows шрифтом Arial, кегль 10 (в том числе в формулах);

Следует различать дефис «-» и тире «—». В тексте тире отделяют единичными пробелами, между цифрами и числами его ставят без пробелов.

Страницы не нумеруют, стили и перекрёстные ссылки к элементам текста не применяют.

3. Индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК);

- инициалы и фамилии авторов;
- название статьи;
- полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием города и страны.

4. Аннотация (авторское резюме) объемом 150–250 слов должна кратко представлять результаты работы и быть понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи, а также информативной, хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации – краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы).

5. Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов – 5–10.

6. Метатекстовые данные (все то, что предшествует основному тексту статьи) приводят на английском языке, причем аннотация должна быть оригинальной (т. е. не являться дословным переводом русскоязычной аннотации). Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводят на русском (белорусском) языке.

7. Объем основного текста статьи должен составлять 10–16 страниц (около 40 тыс. знаков); в него также входят формулы, таблицы и рисунки (число последних не должно превышать 10). Изложенный материал должен быть чётко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). В русско- и белорусскоязычных статьях подрисовочные подписи и надписи непосредственно на иллюстрациях делают на двух языках – русском (белорусском) и английском.

8. Формулы приводят отдельной строкой: набирают в редакторе MathType и нумеруют (в скобках).

Символы, отсутствующие на клавиатуре, набирают через меню «Вставка\Символ». Выключку вверх и вниз (C^2 , C_4) делают через меню «Формат\Шрифт\Верхний индекс», «Формат\Шрифт\Нижний индекс» соответственно. Латинские буквы набирают курсивом, греческие – прямым (следует использовать гарнитуру Symbol). Обозначения

математических функций (lim, sup, ln, sin, Re, Im и т. п.), символы химических элементов (N, Cl, Fe и т. д.) также набирают прямым шрифтом.

9. Черно-белые и цветные рисунки вставляют в текст статьи после первого упоминания о них, а также представляют в виде отдельных файлов в графическом формате (300 точек на дюйм). Фотографии, помещаемые в статью, должны иметь контрастное черно-белое или цветное изображение. Желательно дополнительно представлять иллюстрации в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирают основной гарнитурой, причём начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Размер кегля должен быть соизмерим с размером рисунка (желательно 9 пунктов). Фотографии представляют в виде файлов (tif, jpg, png, eps) и прилагают их распечатку.

10. Таблицы должны иметь названия на русском и английском языках и располагаться непосредственно по тексту. Не рекомендуется выполнять горизонтальные таблицы.

11. Список использованной литературы (не более 40 позиций) оформляют в соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 13.10.2025 № 206. Цитированную литературу приводят общим списком по мере упоминания, ссылки в тексте дают под порядковым номером в квадратных скобках (напр., [1, 4–7, 9] или [2; 5, с. 30]); ссылки на неопубликованные работы не допускаются).

12. Затем приводят список цитированных источников в романском алфавите («References») со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках], название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык – парафраз], выходные данные с обозначениями на английском языке.

13. Если присутствует информация о финансировании (поддержке грантами проектов и т. п.), её приводят на русском (белорусском) и английском языках под заголовками «Благодарности» («Падзякі») и «Acknowledgements».

III. Для подготовки метаданных (так называемого информационного листа) на отдельной странице следует указать на русском и английском языках для каждого автора: фамилию, имя и отчество (полностью), звание, должность, место работы и его адрес, email (для оперативной связи – телефоны).

IV. Статья должна быть подписана всеми авторами. Электронный вариант статьи необходимо представить на диске, флеш-карте или прислать по электронной почте в редакцию журнала по адресу eco@nature-nas.by.

V. Поступившую в редакцию статью направляют на рецензию. Основным критерием целесообразности публикации являются новизна и информативность статьи. Если по рекомендации рецензента статью возвращают автору на доработку, то переработанную рукопись вновь рассматривает редколлегия. Статьи не по профилю журнала возвращают авторам после заключения редколлегии.

Материалы для публикации следует направлять по адресу: ул. Ф. Скорины, 10, комн. 202, редакция журнала «Природопользование», 220076, г. Минск, Республика Беларусь, либо по электронной почте: eco@nature-nas.by. Тел. для справок: +375 (17) 325-84-55.

Научное издание
Scientific publication

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
NATURE MANAGEMENT

№ 1, 2026

Редактор и компьютерная верстка <i>Editor and computer page making</i>	Н. Т. Гавриленко <i>N. T. Haurylenka</i>
--	--

Технический редактор <i>Technical editor</i>	С. В. Ракеть <i>S. V. Rakets</i>
--	--

Подписано в печать 29.06.2026.	<i>Signed into print 29.06.2026.</i>
Формат 60 × 90 1/8.	<i>60 × 90 1/8 format.</i>
Бумага офсетная.	<i>Office paper.</i>
Печать цифровая.	<i>Digital print.</i>
Усл. печ. л. 41.28.	<i>Conditional printed sheets 41.28.</i>
Уч.-изд. л. 28,4.	<i>Conditional edited sheets 28.4.</i>
Тираж 50 экз.	<i>Circulation 50 copies.</i>
Заказ № 000.	<i>Order No. 000.</i>

Полиграфическое исполнение:	<i>Polygraph execution:</i>
Республиканское унитарное предприятие	<i>Republican Unitary Enterprise</i>
«Информационно-вычислительный центр	<i>“Information and Computer Centre</i>
Министерства финансов Республики Беларусь».	<i>of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus”.</i>
ЛП № 02330/89 от 3 марта 2014 г.	<i>Press license no. 02330/89 of March 3, 2014.</i>
Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск.	<i>Kalvarijskaya St. 17, 220004, Minsk.</i>