

ISSN 2079-3928

Природо- пользование



1

2025

Государственное научное учреждение
«Институт природопользования
Национальной академии наук Беларуси»

Природопользование

2025. № 1

Основан в 1996 г. как сборник научных трудов.
В 2018 г. преобразован в журнал.
Включён в Перечень научных изданий ВАК Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований.
Размещён 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*)
Томсон А. Э. – кандидат химических 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
Какарека С. В. – доктор технических наук, профессор
Камышенко Г. А. – кандидат технических наук, доцент
Курзо Б. В. – доктор технических наук, доцент
Кухарчик Т. И. – доктор географических наук, профессор
Логинов В. Ф. – академик, доктор географических наук, профессор
Матвеев А. В. – академик, доктор геолого-минералогических наук, профессор
Струк М. И. – кандидат географических 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)
Руденко Л. Г. – академик НАН Украины, доктор географических наук, профессор (Украина)
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
Тел. +375 17 215-26-32. Факс +375 17 215-24-13
info@nature-nas.by
<https://nature-nas.by/journal>



© Институт природопользования
НАН Беларуси, 2025

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

Nature Management

2025. № 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*)
Aleksey Tomson – Ph. D. (Chemistry), 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
Sergey Kakareka – D. Sc. (Technical), Professor
Halina Kamysheva – Ph. D. (Technical), Docent
Boris Kurzo – D. Sc. (Technical), Docent
Tamara Kukharchyk – D. Sc. (Geography), Professor
Vladimir Loginov – Academician, D. Sc. (Geography), Professor
Aleksey Matveev – Academician, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor
Mikhail Struk – Ph. D. (Geography), 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)
Leonid Rudenko – Academician, D. Sc. (Geography) (Ukraine)
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 Str., 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

Логинов В. Ф., Микуцкий В. С., Бровка Ю. А. <i>Loginov V. F., Mikutskiy V. S., Brovka Yu. A.</i>	Оценка изменений трендов и среднеквадратических отклонений температуры в различных регионах Земного шара за период с 1956 по 2023 г. <i>Assessment of changes in trends and standard deviations of temperature in different regions of the globe for the period from 1956 to 2023</i>	5
Мельник В. И., Буяков И. В., Яцухно В. М., Шумская Т. Г. <i>Melnik V. I., Buyakov I. V., Yatsukhno V. M., Shumskaya T. G.</i>	Оценка увлажнения почв сельскохозяйственных земель Белорусского Поозерья в условиях современного изменения климата <i>Assessment of soil moisture in agricultural lands of Belarusian Lake District in the context of modern climate change</i>	15
Волчек А. А., Гречаник А. В. <i>Volchek A. A., Hrachanik A. V.</i>	Колебания атмосферной циркуляции и изменение ветрового режима на территории Беларуси <i>Variability of atmospheric circulation and changes in the wind regime of the territory of Belarus</i>	27
Кравчук Л. А., Яновский А. А., Баженова Н. М., Живнач С. Г., Быкова Н. К., Книга П. В. <i>Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M., Zhivnach S. G., Bykova N. K., Kniga P. V.</i>	Дистанционная оценка экосистемных функций городской растительности (на примере г. Гомеля) <i>Remote assessment of the ecosystem functions of urban vegetation (on the example of Gomel city)</i>	38
Цзян Чэнь, Червань А. Н. <i>Jiang Chen, Chervan A. N.</i>	Выявление структуры землепользования в зоне влияния Солигорского калийного комбината по данным дистанционного зондирования <i>Identification of land use structure in the zone of influence of the Soligorsk potash plant based on remote sensing data</i>	51
Романкевич Ю. А. <i>Romankevich Ju. A.</i>	Оценка геоэкологического потенциала природных комплексов малых городов Беларуси <i>Assessment of the geoecological potential of natural complexes of small towns in Belarus</i>	64
Басалай Е. Н., Хомич В. С. <i>Basalai E. N., Khomich V. S.</i>	Загрязняющий потенциал осадков городских сточных вод (на примере Брестской области) <i>Polluting potential of urban wastewater sludge (on the example of Brest region)</i>	73
Дорошко Е. Ю., Янута Ю. Г. <i>Dorozhko E. Yu., Yanuta Yu. G.</i>	Антропогенная нагрузка по тяжелым металлам на донные отложения поверхностных водных объектов <i>Anthropogenic heavy metal loading on the bottom sediments of surface water bodies</i>	85
Терлецкая Н. Ф., Антонюк А. С., Гапонюк А. Н., Чухольский А. И. <i>Tsiarletska N. F., Antoniyuk A. S., Gaponiyuk A. N., Chukholski A. I.</i>	Компостирование осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов <i>Composting of sewage sludge and organic part of municipal solid waste</i>	100

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

Жогло В. Г. <i>Zhoglo V. G.</i>	Прогноз изменения качества подземных вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец <i>Forecast of changes in underground waters quality on the territory of the water catchment area of the Lesnaya and the Muhovets rivers</i>	110
Пашкевич В. И., Кухарик Е. А., Кухарик А. М. <i>Pashkevich V. I., Kukharik E. A., Kukharik A. M.</i>	Гидрогеологические факторы, определяющие комфортность среды обитания человека на территории Центральной Беларуси <i>Hydrogeological factors determining the comfort of the human habitat in the territory of Central Belarus</i>	131

**ГЕОТЕХНОЛОГИИ. ДОБЫЧА, ПЕРЕРАБОТКА
И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ**
*GEOTECHNOLOGY. EXTRACTION, PROCESSING
AND THE USE OF SOLID FUEL MINERALS*

Курзо Б. В., Кунцевич В. Б., Гайдукевич О. М., Татков А. Ю., Молочко А. А., Макаренко Т. И., Агейчик И. В., Калилец Л. П. <i>Kurzo B. V., Kuntsevich V. B., Gaidukevich O. M., Tatkov A. Yu., Molochko A. A., Makarenko T. I., Ageichik I. V., Kalilets L. P.</i>	Экспериментальные исследования технологии скважинной гидродобычи сапропеля из-под торфа <i>Experimental studies of the borehole hydraulic extraction technology of sapropel from under peat</i>	138
Агутин К. А. Бровка Г.П., Дедюля И. В. <i>Agutin K. A., Brovka G. P., Dedyulya I. V.</i>	Установки и методики исследования характеристик массопереноса и пучения при промерзании грунтов <i>Installations and methods for studying of mass transfer and swelling characteristics during soil freezing</i>	148
Томсон А. Э., Царюк Т. Я., Соколова Т. В., Навоша Ю. Ю., Пехтерева В. С., Марзан А. С. <i>Thomson A. E., Tsaryuk T. Ya., Sokolova T. V., Navosha Yu. Yu., Pekhtereva V. S., Marzan A. S.</i>	Влияние гранулирования на сорбционные свойства торфа <i>The effect of granulation on the sorption properties of peat</i>	159
Сосновская Н. Е., Ракович В. А., Красноберская О. Г., Добринец Е. А. <i>Sosnovskaya N. E., Rakovich V. A., Krasnoberskaya O. G., Dobrinets E. A.</i>	Оценка трансформации органического вещества при биотехнологической переработке вторичного сырья для получения гранулированных органоминеральных удобрений <i>Evaluation of organic matter transformation during biotechnological processing of secondary raw materials for the production of granulated organomineral fertilizers</i>	168
Жмакова Н. А., Степура М. Ф., Макарова Н. Л., Пась П. В., Матюк Т. В. <i>Zhmaкова N. A., Stepuro M. F., Makarova N. L., Pas P. V., Matyuk T. V.</i>	Удобрение на основе гуминовых кислот с микроэлементами <i>Fertilizer based on humic acids with microelements</i>	180
Крайко В. М., Дударчик В. М., Ануфриева Е. В., Дудникова Е. Л. <i>Kraiko V. M., Dudarchik V. M., Anufrieva E. V., Dudnikova E. L.</i>	Получение фульвоподобных кислот методом окислительной деструкции торфа <i>Production of fulvic acids by peat oxidative destruction method</i>	190
Шелоник М. А., Янута Ю. Г. <i>Shelonik M. A., Yanuta Yu. G.</i>	Фитотоксические свойства фульвоподобных соединений торфа <i>Phytotoxic properties of the fulvo-like compounds of peat</i>	196
Казимирская Е. Н., Лихачева А. В. <i>Kazimirskaya E. N., Likhachova A. V.</i>	Использование мелкодисперсных железосодержащих отходов производства в качестве сырьевых материалов <i>Recycling of fine iron-containing industrial waste as raw materials</i>	203

**ЮБИЛЕИ
JUBILEE**

Жизнь на сломе эпох: к 85-летию со дня рождения академика В. Ф. Логинова <i>Life at the break of epochs: to the 85th anniversary of academician V. F. Loginov</i>	214
К 75-летию со дня рождения Г. П. Бровки <i>To the 75th anniversary of G. P. Brovka</i>	216
К 75-летию со дня рождения М. М. Черепанского <i>To the 75th anniversary of M. M. Cherepanskii</i>	219

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ
GEOGRAPHY. GEOECOLOGY<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-5-14>

УДК 551.583

Поступила в редакцию 28.03.2025

Received 28.03.2025

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ТРЕНДОВ И СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ В РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАХ ЗЕМНОГО ШАРА
ЗА ПЕРИОД С 1956 ПО 2023 г.****В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий, Ю. А. Бровка***Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

Аннотация. Представлены результаты сравнительного анализа изменений величин линейных трендов и среднеквадратических отклонений температуры в различные месяцы года в разных широтных и долготных зонах Земного шара с привязкой к особенностям общей циркуляции атмосферы в период наиболее быстрого потепления климата (1990–2023 гг.) и предшествующий ему период такой же продолжительности (1956–1989 гг.).

Отдельному рассмотрению подвергнуты особенности изменений величин линейных трендов и среднеквадратических отклонений температуры в каждом из трех синоптических районов Северного полушария, а также регионе сезонного Сибирского максимума атмосферного давления.

С учетом арктического усиления потепления климата в последние десятилетия особое внимание было уделено исследованию изменений величины линейных трендов и изменчивости температуры в высокоширотных зонах Земного шара с акцентом на анализ их различий в Северном и Южном полушариях.

Рассмотрены причины увеличения значений положительных трендов температуры в высоких широтах Северного полушария в период современного потепления климата (1990–2023 гг.) в связи с увеличением притоков явного и скрытого тепла в Северном Ледовитом океане в течение последних нескольких десятилетий при образовании льда в осенний период. Получено подтверждение выявленного ранее смещения максимальных скоростей роста температуры в северной полярной шапке на август – ноябрь.

Ключевые слова: линейный тренд; среднеквадратическое отклонение температуры; естественный синоптический район; широтный пояс.

Для цитирования. Логинов В. Ф., Микуцкий В. С., Бровка Ю. А. Оценка изменений трендов и среднеквадратических отклонений температуры в различных регионах Земного шара за период с 1956 по 2023 г. // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 5–14.

**ASSESSMENT OF CHANGES IN TRENDS AND STANDARD DEVIATIONS
OF TEMPERATURE IN DIFFERENT REGIONS OF THE GLOBE
FOR THE PERIOD FROM 1956 TO 2023****V. F. Loginov, V. S. Mikutsky, Yu. A. Brovka***Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

Abstract. A comparative analysis of changes in the linear trends and standard deviations of temperature in different months of the year in different latitudinal and longitudinal zones of the globe with reference to the peculiarities of the general atmospheric circulation during the period of the most rapid climate warming (1990–2023) and the preceding period of the same duration (1956–1989) had been carried out.

The peculiarities of changes in the linear trends and standard deviations of temperature in each of the three synoptic regions of the Northern hemisphere and in the region of the seasonal Siberian maximum of atmospheric pressure were considered separately.

Taking into account the Arctic increase in climate warming in recent decades, special attention was paid to the study of changes in the magnitude of linear trends and temperature variability in the high-latitude zones of the globe with a focus on analysing their differences in the Northern and Southern hemispheres.

The reasons for the increase in the positive temperature trends at high latitudes of the Northern hemisphere during the period of modern climate warming (1990–2023) due to the increase in the inflows of apparent and latent heat in the Arctic ocean during the last few decades during ice formation in the autumn period were considered. Confirmation of the previously revealed shift of the maximum rates of temperature growth in the north polar cap to August–November had been obtained.

Keywords: linear trend; standard deviation of temperature; natural synoptic region; latitudinal belt.

For citation. Loginov V. F., Mikutskiy V. S., Brovka Yu. A. Assessment of changes in trends and standard deviations of temperature in different regions of the globe for the period from 1956 to 2023. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 5–14.

Введение. Результаты исследований пространственно-временных изменений линейных трендов температуры (коэффициента β линейного тренда $y = \alpha + \beta x$) получали многократно [1–8]. Настоящая работа является логическим продолжением исследований, представленных в наших более ранних публикациях [1–5], а также работах других авторов [6–8]. Пространственно-временные особенности изменений среднеквадратических отклонений температуры (σ) геопотенциала поверхности 1000 гПа в Северном полушарии представлены в нашей публикации [9]. Как правило, подавляющее число работ проводилось без привязки к географическим особенностям общей циркуляции атмосферы. В настоящей работе этот недостаток был частично устранен: особенности пространственно-временных изменений зональной и меридиональной циркуляции, а также широтный ход кинетической энергии вихрей (циклонов и антициклонов) на H_{500} в реальной атмосфере, в моделях сухой и влажной атмосферы принимались во внимание при анализе изменений β и σ в разных широтных зонах в различные временные периоды.

Еще в начале 1960-х годов Б. И. Сазоновым [10, 11] по 12 широтным кругам (20–75° с. ш. через каждые 5°) с ежедневных высотных барических карт H_{500} были сняты значения индекса возмущенности атмосферной циркуляции. Анализ среднемесячных значений индексов атмосферной возмущенности показал, что в экваториальных областях циклоны и антициклоны отсутствуют и напряженность меридиональной циркуляции здесь мала. В умеренных широтах (от 30 до 55° с. ш.) происходит примерно линейное нарастание напряженности меридиональной циркуляции и примерно линейное нарастание числа циклонов и антициклонов [10, 11]. Наибольшая интенсивность барических образований в умеренных широтах отмечается зимой, а наименьшая – летом. В высоких широтах (60–75° с. ш.) рост интенсивности барических образований прекращается: в зависимости от сезона года здесь наблюдается чаще слабое падение интенсивности меридиональной циркуляции или «плато» в ее изменении (февраль – март). В приполярных широтах (широта более 70° с. ш.) просматривается весьма слабый рост интенсивности меридиональной циркуляции, особенно в теплые месяцы года. В этих широтах выявлено наличие полугодовых вариаций в интенсивности циклонов и антициклонов, а также напряженности меридиональной циркуляции. В июне – июле и феврале – марте здесь отмечается сильная возмущенность атмосферной циркуляции. Характерной особенностью тропосферной возмущенности является наличие максимума напряженности меридиональной циркуляции на широтах 55–58° с. ш.

Известно, что максимум напряженности меридиональной циркуляции не обнаруживает смещения в средней и верхней тропосфере по широте в течение года, он расположен постоянно в интервале широт 50–55° с. ш., тогда как максимум зональной циркуляции мигрирует по широте в течение года.

Широтный ход кинетической энергии на H_{500} в реальной атмосфере имеет максимум вблизи 50° с. ш., а в моделях сухой атмосферы – вблизи 40° с. ш. Минимумы широтного хода в обоих случаях расположены в высоких (полярных) и низких (0–15° с. ш.) широтах. Введение влагооборота приближает модель к реальным условиям, но сильно занижает максимальную энергию вихрей и делает их широтный ход вялым: высокие значения кинетической энергии размыты и находятся в средних широтах, другой максимум находится вблизи экватора, минимум – в полярных широтах, а слабый (вторичный) минимум вблизи 20° с. ш. [11–14].

В нижнем 2–3-километровом слое атмосферы могут существовать свои источники и стоки кинетической энергии по сравнению с таковыми в верхней и средней тропосфере [11]. В этой работе сделан интригующий вывод о том, что основные долготные и широтные особенности общей циркуляции атмосферы формируются не у подстилающей поверхности (классические представления), а на высотах 8–12 км. По мнению авторов, они связаны с влиянием электромагнитного солнечного излучения и заряженных частиц солнечного и галактического происхождения.

С учетом вышеизложенного возникает необходимость рассмотреть широтные особенности изменений величин трендов температуры в различных широтных зонах и разные месяцы года для двух временных периодов: 1956–1989 и 1990–2023 гг. Проводимые нами в настоящее время исследования показали, что для этих двух периодов характерны отличающиеся друг от друга величины градиентов температуры «экватор – полюс». Для периода с 1990 по 2023 г. характерно уменьшение напряженности зональной циркуляции и рост напряженности меридиональной циркуляции и, как следствие, междуширотного воздухообмена. Поскольку максимум кинетической энергии барических образований (циклонов и антициклонов) и наибольшие значения коэффициентов макротурбулентной диффузии происходят около 50° с. ш., то в этой широтной зоне должен наблюдаться максимальный воздухообмен и, вероятно, наибольший рост величины линейных трендов температуры.

Однако, как установлено в работах [10, 11], наибольшая напряженность меридиональной циркуляции в средней тропосфере (H_{500}) в различные месяцы года имеет место в широтной зоне 55–58° с. ш.,

а в высоких широтах (60–75° с. ш.) два раза в год (июнь – июль и февраль – март) наблюдается сильная возмущенность атмосферной циркуляции: формируется квазиполугодовая цикличность в изменении напряженности меридиональной циркуляции.

Материалы и методика исследований. Предметом исследования в работе является годовой ход температуры атмосферы в Северном полушарии.

Использованы данные Национальных центров экологической информации (NCEI) (<https://www.ncsl.noaa.gov>) о температуре по 5-градусным квадратам за период с 1956 по 2023 г. Проанализированы два подпериода, продолжительность которых близка к рекомендованному Всемирной метеорологической организацией (ВМО) 30-летнему периоду для вычисления норм и других статистических параметров: а) 1956–1989 гг. и б) 1990–2023 гг. Некоторое отклонение от рекомендаций ВМО связано со следующими причинами. С конца 1980-х – начала 1990-х годов отмечалось резкое увеличение температуры высоких широт Северного полушария, обусловившее такое же резкое снижение ледовитости Северного Ледовитого океана. Через два десятилетия скорость уменьшения ледовитости замедлилась [4].

Вышеизложенное послужило одним из аргументов при выборе границы двух подпериодов. Еще одним аргументом стала оценка повторяемости наиболее теплых лет за период инструментальных наблюдений: 15 наиболее теплых лет на Земном шаре за период (1850–2024 гг.) относятся к последнему периоду (1990–2024 гг.). Следует также отметить, что произошло увеличение до 1 Вт/м² радиационного воздействия парниковых газов на климат к началу выбранного периода по сравнению с прединструментальным периодом (1750–1900 гг.). В конце этого периода радиационный форсинг парниковых газов и аэрозолей антропогенного происхождения превысил 2,5 Вт/м², что близко к пороговому значению первого из четырех сценариев изменений парниковых газов (RCP 2.6) [The IPCC's Fifth Assessment Report (AR5); https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/04/ipcc_ar5_leaflet.pdf] и повышению температуры более чем на 1 °C, по сравнению с доиндустриальным уровнем, при принятом Парижском соглашением пороговом значении потепления 2 °C (Adoption of the Paris agreement, Paris, 2015; <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>). Дополнительным аргументом в пользу выбора названных границ двух подпериодов послужила работа [15], в которой при расчетах величины линейных трендов температуры и вклада воздухообмена между полярной шапкой и остальными широтами (0–60° с. ш.) начальными годами использованного периода наблюдений взяты 1989 и 1990 г.

Исследование годового хода температуры выполнено для отдельных широтных зон. Для анализа были выбраны следующие зоны: 0–10° с. ш., 30–40° с. ш., 50–55° с. ш., 55–60° с. ш., 65–70° с. ш., 75–90° с. ш. (полярная шапка).

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим тренды температуры для каждого месяца года для периода современного потепления климата (1990–2023 гг.) и предшествующего ему периода той же продолжительности (1956–1989 гг.) для различных широтных зон, выделенных с учетом особенностей изменений кинетической энергии вихрей (циклонов и антициклонов) и возмущенности меридиональной циркуляции в средней тропосфере (H_{500}) в разных широтных зонах (см. таблицу).

Из рис. 1 видно, что величины линейных трендов возрастают с ростом широты, достигая максимальных значений в полярной шапке в холодное время года. Этим самым подтверждается установленное ранее арктическое усиление потепления климата.

Коэффициенты линейного тренда температуры в различных широтных поясах Северного полушария в годовом ходе для двух временных периодов представлены на рис. 1 (среднегодовые значения отмечены пунктирной линией). Коэффициенты линейного тренда температуры в полярной шапке (см. рис. 1, е) максимальны в период с октября по февраль и минимальны в июне и июле в период наибольшего роста температуры (1990–2023 гг.). В предыдущий временной период величины трендов температуры в различные месяцы года изменялись незначительно: для теплого времени года (апрель – август) был характерен небольшой и размытый минимум в скорости изменения температуры (вплоть до слабого отрицательного тренда в апреле и июле), а в месяцы холодного времени года (сентябрь – март, исключая ноябрь) отмечался слабый положительный линейный тренд температуры.

В приполярных областях (65–70° с. ш.) значения коэффициентов β заметно уменьшаются по сравнению с полярной шапкой, а в более южных широтных зонах значения коэффициентов линейного тренда температуры становятся существенно ниже. Следует отметить, что если в высоких широтах (65–90° с. ш.) в последний период (1990–2023 гг.) максимум значений трендов в основном наблюдается в осенние месяцы года, а минимум – на июнь – июль, то для более южных зон максимум приходится чаще на конец лета – осень, захватывая иногда начало зимы. Отмеченный характер усиления потепления во втором полугодии кардинально отличается от картины потепления в первом периоде (1956–1989 гг.), когда на вторую половину года приходились наиболее низкие (отрицательные) значения трендов температуры; в средних широтах в начале и середине весны, наоборот, отмечалось заметное потепление.

**Коэффициенты линейных трендов температуры в широтных поясах Северного полушария
для двух временных периодов (1956–1989 и 1990–2023 гг.)**

**Coefficients of linear trends in Northern Hemisphere latitudinal belt temperature
for two time periods (1956–1989 and 1990–2023)**

Временной период, годы	Месяц												Средне- годовое значение
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0–10° с. ш.													
1990–2023	0,013	0,013	0,014	0,015	0,016	0,014	0,019	0,019	0,020	0,022	0,021	0,019	0,017
1956–1989	0,012	0,011	0,013	0,013	0,013	0,015	0,013	0,013	0,015	0,015	0,014	0,012	0,013
30–40° с. ш.													
1990–2023	0,017	0,019	0,028	0,011	0,009	0,017	0,025	0,025	0,031	0,031	0,024	0,021	0,021
1956–1989	–0,013	–0,017	–0,013	–0,005	0,000	–0,001	–0,009	–0,008	–0,005	–0,009	–0,002	–0,012	–0,008
50–55° с. ш.													
1990–2023	0,023	0,001	0,019	–0,013	–0,008	0,019	0,029	0,036	0,044	0,037	0,040	0,023	0,021
1956–1989	0,002	–0,012	0,017	0,033	0,010	–0,001	0,009	0,011	0,003	–0,039	–0,021	0,014	0,002
55–60° с. ш.													
1990–2023	0,033	0,014	0,023	–0,004	–0,002	0,016	0,022	0,040	0,049	0,048	0,044	0,036	0,026
1956–1989	0,015	0,014	0,034	0,035	0,011	–0,010	–0,002	0,000	–0,008	–0,032	–0,001	0,012	0,006
65–70° с. ш.													
1990–2023	0,050	0,038	0,040	0,042	0,011	0,003	0,000	0,044	0,081	0,105	0,097	0,061	0,048
1956–1989	–0,014	0,018	0,011	0,000	0,010	–0,020	–0,021	–0,011	–0,059	–0,012	0,021	0,031	–0,004
75–90° с. ш.													
1990–2023	0,153	0,169	0,100	0,084	0,050	0,011	0,016	0,047	0,115	0,236	0,160	0,193	0,111
1956–1989	0,047	0,039	0,040	–0,009	0,019	0,001	–0,002	0,005	0,049	0,035	–0,015	0,034	0,020

Наиболее значительный прирост величин линейного тренда температуры (скорости роста потепления) в период современного потепления климата (1990–2023 гг.) от первого полугодия ко второму (июль – август) произошел для широтных зон вблизи максимума кинетической энергии на H_{500} в реальной атмосфере (50–55° с. ш.), вблизи максимума напряженности меридиональной циркуляции (55–60° с. ш.), а также в полярных широтах (65–90° с. ш.) (рис. 1, 2).

С учетом арктического усиления потепления климата в последние десятилетия, а также ввиду значительного роста значений коэффициентов линейного тренда температуры при переходе в области вблизи и выше полярных кругов Северного и Южного полушарий, более детально рассмотрим характер изменения линейных трендов в этих областях (65–90° с. ш. и ю. ш.) для каждого месяца года двух сравниваемых периодов времени (1956–1989 и 1990–2023 гг.). Годовая динамика коэффициентов линейных трендов температуры для двух сравниваемых периодов времени в обоих полушариях приведена на рис. 2, а, б.

Из рис. 2 следует, что для предшествующего интенсивному потеплению климата периода (1956–1989 гг.) коэффициенты линейного тренда (β) температуры в приполярных областях колебались в пределах от –0,01 до +0,03 °C в Северном и от –0,02 до +0,08 °C в Южном полушарии.

При этом в Северной приполярной области отмечен прирост значений β для всех месяцев года (см. рис. 2, а). В Северном полушарии в период современного потепления климата значения β существенно увеличились во второй половине года (август – декабрь), достигнув максимальных значений в октябре. На это обстоятельство мы обращали внимание в предыдущих наших работах [4, 16] и приведенном в статье обзоре. В указанных работах рассмотрены и возможные причины изменения характера годового хода температуры.

В период современного потепления климата (1990–2023 гг.) в южной приполярной области в теплое (декабрь – февраль) и холодное (июнь – июль) время года наметилось снижение величин линейных трендов температуры, т. е. просматривается наличие квазиполугодового колебания в изменении β ; минимумы β приходятся на период летнего и зимнего солнцестояния.

Для северной полярной шапки характерна «одногорбая» кривая изменений β в годовом ходе с ярко выраженным осенним максимумом, природа которого, вероятно, связана с годовым циклом потоков явного и скрытого тепла в Северном Ледовитом океане, максимум которого приходится на осень [4, 16].

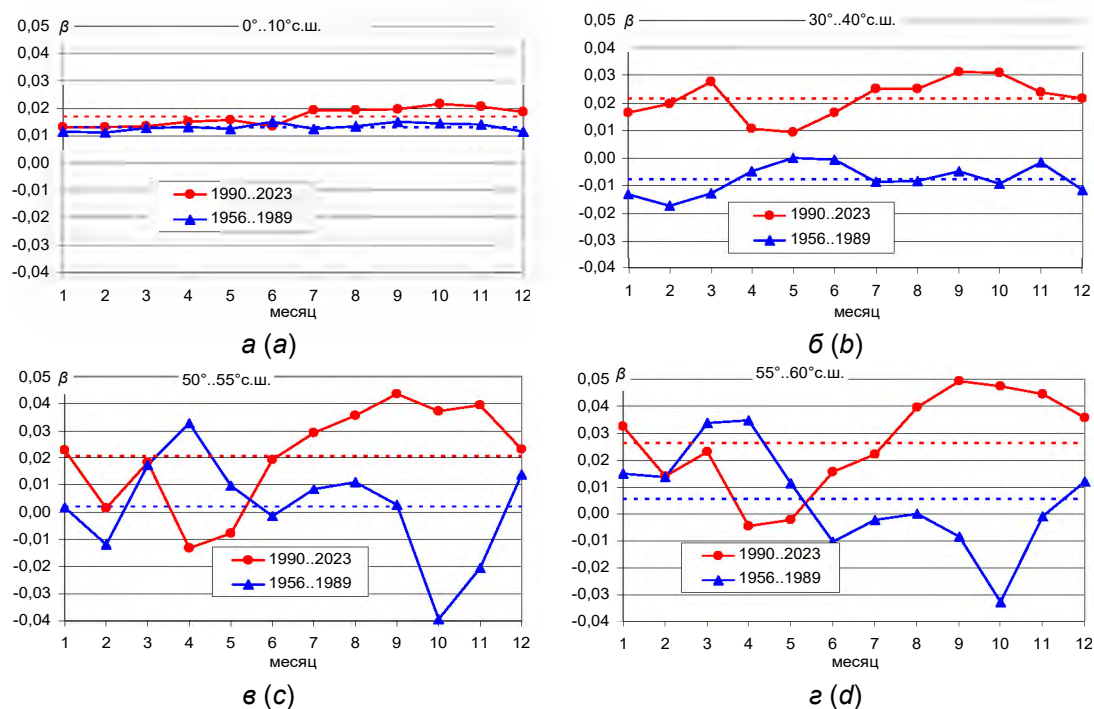


Рис. 1. Коэффициенты линейных трендов β температуры в различных широтных поясах низких и умеренных широт Северного полушария для двух временных периодов (1956–1989 и 1990–2023 гг.)

Fig. 1. Linear trends coefficients β of temperature in different latitudinal belt's of the low and temperate latitudes of the Northern hemisphere for two time periods (1956–1989 and 1990–2023)

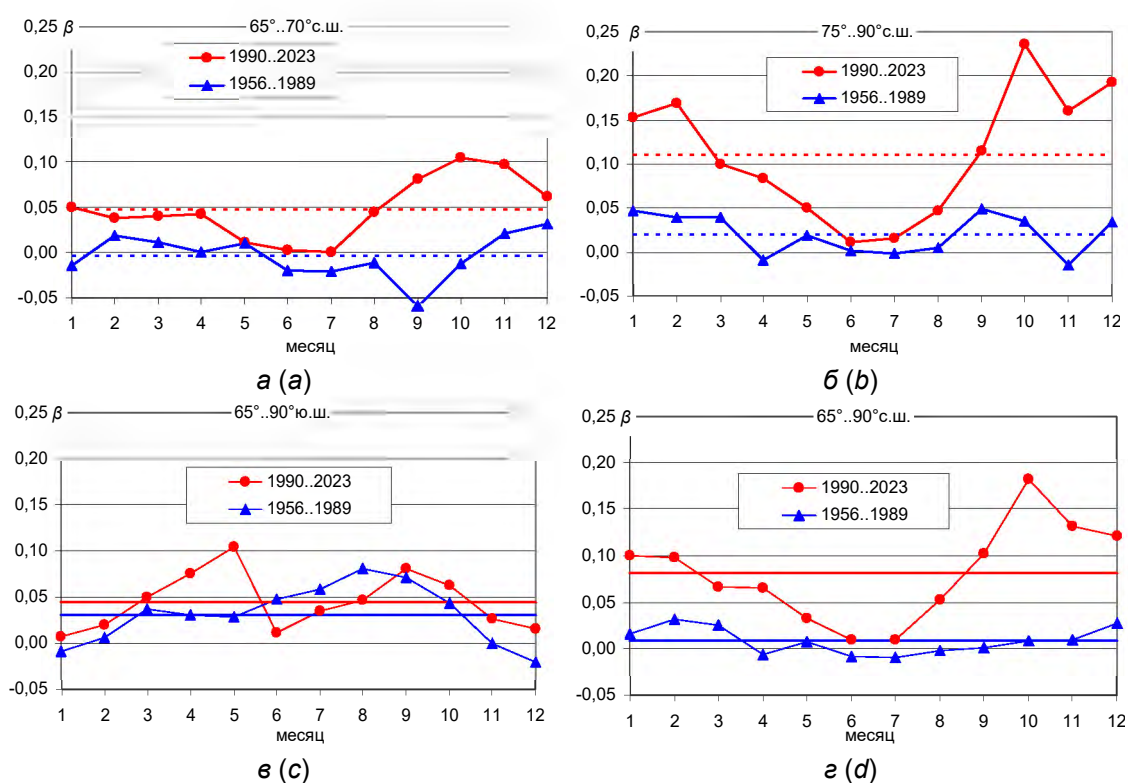


Рис. 2. Коэффициенты линейных трендов температуры β в приполярных широтных поясах Северного (а, б, г) и Южного (в) полушарий (65–90° с. ш. и ю. ш.) и их среднегодовые значения для двух временных периодов (1956–1989 и 1990–2023 гг.)

Fig. 2. Linear trends coefficients β of temperature in the circumpolar latitudinal belt's of the Northern (a, b, d) and Southern (c) hemispheres for two time periods (1956–1989 and 1990–2023)

Отдельно анализу были подвергнуты пространственно-временные особенности изменений величин коэффициентов линейного тренда температуры (β) и среднеквадратических отклонений (σ) температуры для периода современного потепления климата (1990–2023 гг.) и предшествующего периода (1956–1989 гг.) для трех естественных синоптических районов севернее 30° с. ш. (ЕСР) [17]. Синоптические процессы в каждом из них обладают определенными особенностями и могут изучаться независимо от процессов, происходящих в других частях Земли. Известно также, что в границах ЕСР разворачивается естественный синоптический сезон, в течение которого наблюдаются типичные или нетипичные для него синоптические процессы. Границы каждого из трех естественных синоптических районов простираются:

- 1) от Гренландии до Таймыра (приблизительно совпадает с 1-м ЕСР Б. П. Мультановского);
- 2) от Таймыра до Берингова пролива (Восточная Сибирь);
- 3) от Берингова пролива до Гренландии (Американский сектор).

Кроме того, отдельно рассмотрен район, где происходит формирование Сибирского максимума атмосферного давления в холодное время (СибМакс) с западной границей по меридиану 70° (восточная часть бассейна р. Обь) и восточной границей по меридиану 125° (р. Лена).

Прежде всего, рассмотрим пространственно-временные особенности изменений коэффициентов линейных трендов температуры (β) для двух временных периодов (1990–2023 и 1956–1989 гг.). На рис. 3 приведены значения разностей коэффициентов линейных трендов температуры для указанных выше временных периодов для разных ЕСР Северного полушария и района формирования зимнего Сибирского максимума атмосферного давления.

Из рис. 3, а следует, что максимальные разности β приходятся на вторую половину года, особенно на осенний период года (сентябрь – ноябрь); наибольшие разности β отмечаются в полярной шапке (75–90° с. ш.) и вблизи полярного круга (65–70° с. ш.) в 1-м ЕСР (Атлантическом, 20° з. д. – 105° в. д.) и 3-м ЕСР (Американском, 175–50° з. д.) – во вторую половину осени – начале зимы (октябрь – декабрь). Во 2-м ЕСР (Восточная Сибирь) наибольшие разности β пришлись на сентябрь – октябрь в умеренных и высоких широтах (45–90° с. ш.).

В годовом ходе во всех долготных секторах в конце зимы и весной (февраль – май) отмечаются либо наименьшие значения разностей скорости роста температуры, либо даже отрицательные их значения. Степень выраженности этих тенденций наиболее заметна в 1-м ЕСР, менее выражена во 2-м ЕСР и области формирования Сибирского максимума атмосферного давления. При общем сходстве интересно отметить наличие определенных отличий в широтном распределении разностей трендов температуры для последнего региона и отчасти перекрывающего его 2-го ЕСР. Это особенно заметно в холодное время года, когда формируется указанный максимум. Указанная особенность свидетельствует о важности проявления начальных барических условий на величину линейных трендов температуры, т. е. скорость потепления климата.

Из работы [4] следует, что скорость роста температуры в высоких широтах в период с 1990 до 2022 г. значительно изменяется в различные месяцы года. Так, среднее повышение температуры в полярной шапке (70–90° с. ш.) в октябре – апреле, когда Северный Ледовитый океан покрыт льдом, составило 4,2 °С. Положительная альбедная связь обеспечивает около одной трети указанного повышения температуры, а остальная часть повышения температуры в период с 1990 по 2022 г. связана с ростом тепло- и влагообмена океана и атмосферы. Теоретические и экспериментальные оценки притоков явного и скрытого турбулентного тепла в Северном Ледовитом океане показали, что максимальные притоки явного и скрытого тепла приходятся на октябрь. Для этого месяца года, как показано в работе [4], характерны самые высокие скорости роста температуры в высоких широтах Северного полушария, то есть самое большое по величине арктическое усиление потепления климата. Выявлено смещение максимальных скоростей роста температуры в северной полярной шапке на август – ноябрь. Установлено, что максимальная скорость роста температуры в широтном поясе 30–65° с. ш. сместилась в период современного потепления на осень (сентябрь – ноябрь), тогда как раньше наблюдалась в январе – апреле, что трудно объяснить исходя из парниковой теории климатических изменений.

Определенного внимания заслуживает рассмотрение изменений среднеквадратических отклонений температуры (σ) для двух указанных выше временных периодов (1990–2023 и 1956–1989 гг.) (см. рис. 3, б).

В годовом ходе изменчивость температуры при потеплении климата стала меньше в феврале в большинстве широтных зон рассматриваемых секторов Северного полушария. Исключение составили южная граница региона расположения Сибирского максимума и умеренные широты 1-го ЕСР (45–60° с. ш.), как и в случае нормированных разностей коэффициентов тренда β (см. рис. 3, а). Из рис. 3, б следует в целом сохранение, хотя и меньших по величине, различий нормированных разностей среднеквадратических отклонений температуры между первой и второй половинами года. Сказанное особенно характерно для Американского сектора (3-го ЕСР).

В высоких широтах Восточной Сибири (65–70° с. ш. и 70–125° в. д.) нормированные разности σ достигают больших значений почти во все месяцы года (исключение составляет ноябрь). Проведенный анализ изменений среднеквадратических отклонений температуры позволяет сделать вывод о существенных региональных отличиях в изменениях температуры в полярной шапке в Сибирском секторе – от р. Обь до Берингова пролива. В годовом ходе изменчивость температуры при потеплении климата стала меньше в феврале в большинстве широтных зон рассматриваемых секторов Северного полушария. Исключение составляют южная часть региона формирования Сибирского максимума атмосферного давления и район умеренных широт 1-го ЕСР (45–60° с. ш.). Таким образом, в целом изменения пространственно-временных особенностей среднеквадратических отклонений температуры сравниваемых периодов времени (1956–1989 и 1990–2023 гг.) оказались менее выраженными в годовом ходе по сравнению с изменениями величины линейных трендов температуры.

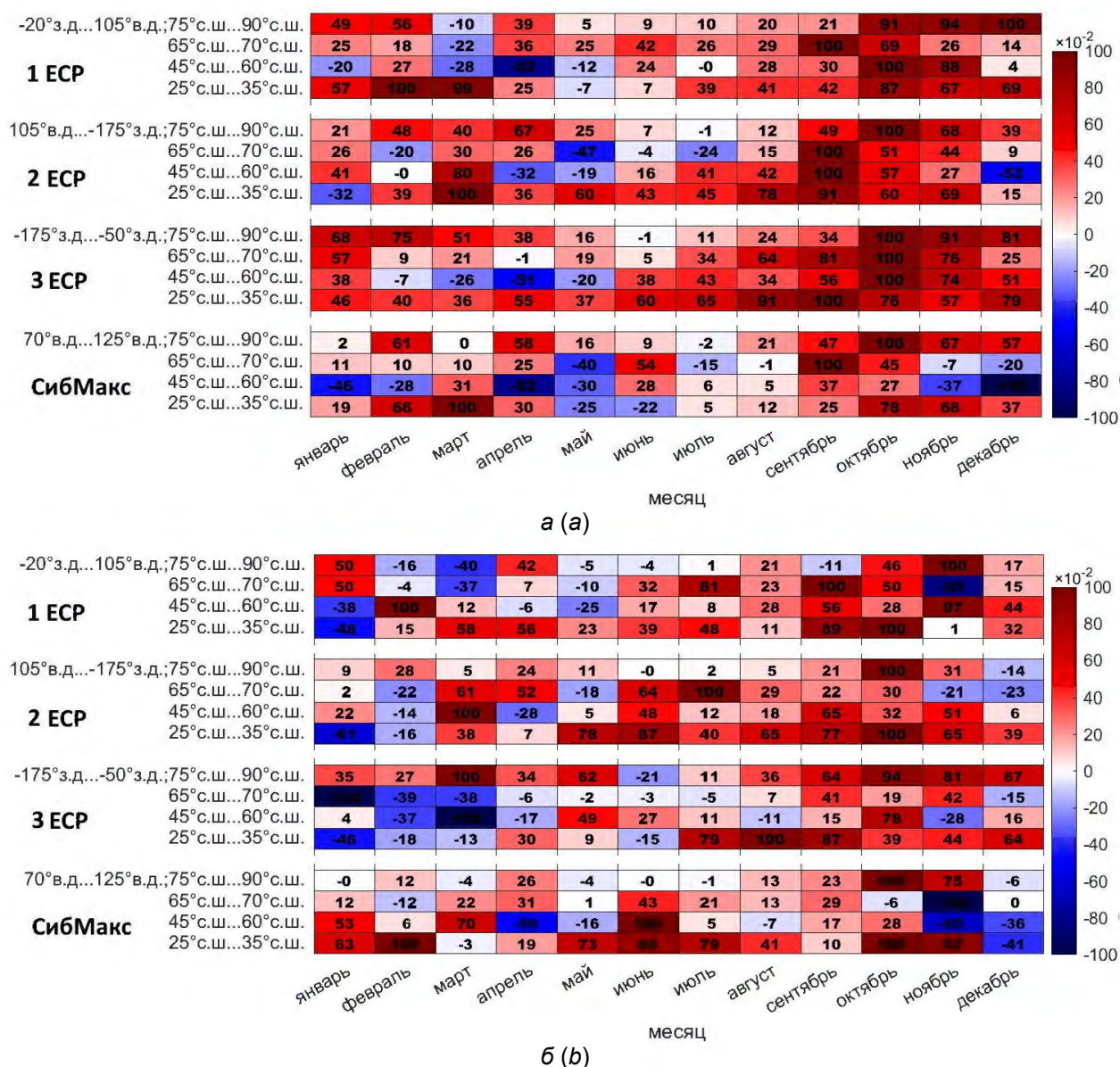


Рис. 3. Разности коэффициентов линейных трендов β (а) и среднеквадратических отклонений σ температуры (б) (нормализованных по каждому широтному поясу отдельно) в различных широтных поясах трех естественных синоптических районов и области Сибирского максимума атмосферного давления для двух временных периодов (1956–1989 и 1990–2023 гг.)

Fig. 3. Differences of linear trend coefficients β (a) and standard deviations σ of temperature (b) (normalised for each latitudinal belt separately) in different latitudinal belts of three natural synoptic regions (ЕСР) and the Siberian maximum atmospheric pressure region (СибМакс) for two time periods (1956–1989 and 1990–2023)

Выводы. Проведенное исследование позволило выявить ключевые особенности изменения температурных трендов и среднеквадратических отклонений температур в различных широтных зонах Земного шара за два периода: 1956–1989 гг. и 1990–2023 гг. Основные выводы работы можно сформулировать следующим образом:

1. Наблюдается значительное увеличение коэффициентов линейных трендов температуры с ростом широты, особенно в полярных регионах (арктическое усиление потепления). В период 1990–2023 гг. максимальные значения трендов зафиксированы в холодное время года (октябрь – февраль), что подтверждает феномен арктического усиления потепления. Скорость роста температуры в полярной шапке (75–90° с. ш.) достигла максимальных значений, особенно в осенние месяцы. Отмеченный характер усиления современного потепления во втором полугодии кардинально отличается от картины потепления климата в первом периоде (1956–1989 гг.), когда на вторую половину года приходились наиболее низкие (отрицательные) значения трендов температуры, в то время как в средних широтах в начале и середине весны, наоборот, отмечалось заметное потепление.

2. В более южных широтах (30–60° с. ш.) тренды температуры также демонстрируют ее рост, однако их значения существенно ниже, чем в полярных регионах. Внутригодовая динамика трендов в этих зонах характеризуется смещением максимумов трендов к теплым месяцам года.

3. Анализ изменений коэффициентов линейных трендов температуры β и среднеквадратических отклонений σ для различных естественных синоптических районов показал, что наибольшие изменения происходят в осенний период, особенно в Восточной Сибири и полярных регионах. Это может свидетельствовать о значительном влиянии начальных циркуляционных условий на пространственно-временные изменения линейных трендов температуры.

4. В Южном полушарии наблюдается менее выраженное потепление по сравнению с Северным, однако в приполярных областях Южного полушария также отмечается увеличение величины трендов температуры в период современного потепления климата, особенно в осенние и весенние месяцы. В то же время в зимние месяцы (июнь – август) в Южном полушарии наблюдается снижение величины трендов температуры. В период современного потепления (1990–2023 гг.) изменчивость температуры σ в полярных регионах Северного полушария увеличилась. Обнаружено наличие квазиполугодового колебания в изменении величины линейного тренда температуры (скорости потепления в годовом ходе).

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что современные изменения носят различный сезонный и пространственный характер, что может свидетельствовать о некотором различии механизмов климатических изменений в разных пространственно-временных масштабах.

Исследование проведено при поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований (грант № Х23РНФ-122).

Список использованных источников

1. Логинов, В. Ф. Изменения климата: тренды, циклы, паузы / В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий. – Минск : Беларус. навука, 2017. – 179 с.
2. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск : Беларус. навука, 2019. – 315 с.
3. Логинов, В. Ф. Диагноз глобального климата / В. Ф. Логинов. – СПб. : Лема, 2021. – 304 с.
4. Логинов, В. Ф. Современные изменения климата / В. Ф. Логинов ; НАН Беларуси, Ин-т природопользования, НПО «Гидропроект». – СПб. : Лема, 2024. – 267 с.
5. Логинов, В. Ф. Изменения величин коэффициентов линейных трендов температуры в Северном и Южном полушариях и их возможные причины / В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий, Ю. А. Бровка // Природные ресурсы. – 2021. – № 2. – С. 5–13.
6. Панин, Г. И. Анализ климатических тенденций в высоких широтах Северного полушария / Г. И. Панин, Т. Ю. Выручалкина, И. В. Соломонова // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2008. – № 6. – С. 31–41.
7. Кошельков, Ю. П. Температурные тренды в Антарктиде и смежных районах / Ю. П. Кошельков // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 5. – С. 111–112.
8. Trends '93: A compendium of data on global change / ed. by Thomas A. Boden, Paul Kanciruk, Michael P. Farrell. – Oak Ridge, Tennessee : Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, 1994. – XVIII, 984 p.
9. Логинов, В. Ф. Циркуляционные особенности формирования холодных и теплых зим в Северном полушарии (на примере Беларуси) / В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 499–507.
10. Сазонов, Б. И. Высокие барические образования и солнечная активность / Б. И. Сазонов. – Л. : Гидрометеоздат, 1964. – 130 с.
11. Витинский, Ю. И. Солнце и атмосфера Земли / Ю. И. Витинский, А. И. Оль, Б. И. Сазонов ; под ред. Э. Г. Мустеля. – Л. : Гидрометеоздат, 1976. – 351 с.

12. Манабе, С. Климат и циркуляция океана / С. Манабе, К. Брауэн. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – 192 с.
13. Кароль, И. Л. Радиактивные изотопы и глобальный перенос в атмосфере / И. Л. Кароль. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – 336 с.
14. Smagorinsky, J. General circulation with the primitive equation / J. Smagorinsky // Monthly Weather Review. –1963. – Vol. 91, № 3. – P. 99–164.
15. Алексеев, Г. В. Арктическое усиление: роль междуширотного обмена в атмосфере / Г. В. Алексеев, Н. Е. Харланенкова, А. Е. Вязилова // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2023. – Т. 9, № 1. – С. 13–32. – DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-13-32.
16. Логинов, В. Ф. Роль различных факторов в арктическом усилении потепления климата / В. Ф. Логинов // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2023. – Т. 5, вып. 1. – С. 34–58.
17. Российский гидрометеорологический словарь / под ред. А. И. Бедрицкого. – СПб. ; М. : Летний сад, 2008. – Т. 1 : А–И. – 336 с.

References

1. Loginov V. F., Mikutsky V. S. *Izmeneniya klimata: trendy, tsikly, pauzy* [Climate Change: Trends, Cycles, Pauses]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, 179 p. (in Russian)
2. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Sovremennyye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata* [Current global and regional climate changes]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019, 315 p. (in Russian)
3. Loginov V. F. *Diagnoz global'nogo klimata* [Diagnosis of global climate]. St. Petersburg, Lema Publ., 2021, 304 p. (in Russian)
4. Loginov V. F. *Sovremennyye izmeneniya klimata* [Contemporary climate changes]. *Natsional'naya akademiya nauk Belarusi, Institut prirodnopol'zovaniya, Nauchno-proizvodstvennoe ob'edinenie «Gidroproekt»* [National academy of sciences of Belarus, Institute of nature management, Research and production association "Gidroproekt"]. St. Petersburg, Lema Publ., 2024, 267 p. (in Russian)
5. Loginov V. F., Mikutskiy V. S., Brovka Yu. A. *Izmeneniya velichin koefitsientov lineynykh trendov temperatury v Severnom i Yuzhnom polushariyakh i ikh vozmozhnyye prichiny* [Changes in linear trend coefficients of temperature in the Northern and Southern hemispheres and their possible causes]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2021, no. 2, pp. 5–13. (in Russian)
6. Panin G. I., Vyrutchalkina T. Yu., Solomonova I. V. *Analiz klimaticheskikh tendentsiy v vysokikh shirotakh Severnogo polushariya* [Analysis of climate trends in high latitudes of the Northern hemisphere]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2008, no. 6, pp. 31–41. (in Russian)
7. Koshelkov Yu. P. *Temperaturnyye trendy v Antarktide i smezhnykh rayonakh* [Temperature Trends in Antarctica and Adjacent Regions]. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 1990, no. 5, pp. 111–112. (in Russian)
8. Trends '93: A Compendium of Data on Global Change. Ed. by T. A. Boden, P. Kanciruk, M. P. Farrell. Oak Ridge, Tenn., Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, 1994, XVIII, 984 p.
9. Loginov V. F., Mikutskiy V. S. *Tsirkulyatsionnye osobennosti formirovaniya kholodnykh i teplykh zim v Severnom polusharii (na primere Belarusi)* [Circulation features of cold and warm winters in the northern hemisphere (case study of Belarus)]. *Prirodnopol'zovanie = Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 499–507. (in Russian)
10. Sazonov B. I. *Vysokie baricheskie obrazovaniya i solnechnaya aktivnost'* [High-Pressure Systems and Solar Activity]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1964, 130 p. (in Russian)
11. Vitinskiy Yu. I., Ol A. I., Sazonov B. I. *Solntse i atmosfera Zemli* [The Sun and the Earth's Atmosphere]. Ed. by E. R. Mustel. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976, 351 p. (in Russian)
12. Manabe S., Bryan K. *Klimat i tsirkulyatsiya okeana* [Climate and Ocean Circulation]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, 192 p. (in Russian)
13. Karol I. L. *Radioaktivnye izotopy i global'nyy perenos v atmosfere* [Radioactive Isotopes and Global Transport in the Atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, 336 p. (in Russian)
14. Smagorinsky J. General Circulation with the Primitive Equations. *Monthly Weather Review*, 1963, vol. 91, no. 3, pp. 99–164.
15. Alekseev G. V., Kharlanenkova N. E., Vyazilova A. E. *Arkticheskoe usilenie: rol' mezhdushirotnogo obmena v atmosfere* [Arctic Amplification: The Role of Interlatitudinal Exchange in the Atmosphere]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*, 2023, vol. 9, no. 1, pp. 13–32. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-1-13-32. (in Russian)
16. Loginov V. F. *Rol' razlichnykh faktorov v arkticheskoy usilenii potepleniya klimata* [The Role of Various Factors in Arctic Amplification of Climate Warming]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya = Hydrosphere. Hazardous Processes and Phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 1, pp. 34–58 (in Russian)
17. *Rossiyskiy gidrometeorologicheskiy slovar'* [Russian Hydrometeorological Dictionary]. Ed. by A. I. Bedritsky. St. Petersburg, Moscow, Letniy Sad Publ., 2008, vol. 1 : A–I, 336 p. (in Russian)

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: info@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: mvs@nature-nas.by

Бровка Юлия Александровна – кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: brovka.yuliya@mail.ru

Information about the authors

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

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

Yuliya A. Brovka – Ph. D. (Geography), Assistant professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: brovka.yuliya@mail.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-15-26>
УДК 551.582.2

Поступила в редакцию 25.03.2025
Received 25.03.2025

ОЦЕНКА УВЛАЖНЕНИЯ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

В. И. Мельник¹, И. В. Буяков¹, В. М. Яцухно², Т. Г. Шумская³

¹Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;

³Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения
и мониторингу окружающей среды, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье представлены результаты исследований по оценке влажности почвы на сельскохозяйственных угодьях Белорусского Поозерья по данным сети гидрометеорологических наблюдений за 1989–2022 гг. Дана оценка динамики запасов продуктивной влаги в слое 0–20 см; оценена продолжительность почвенных засух и повторяемость лет с почвенной засухой по месяцам на территории Белорусского Поозерья. Избыточное увлажнение почвы наиболее заметно в ранневесенний и позднесенний периоды на тяжелых почвах (тяжелые и средние суглинки) – в пунктах Езерище, Шарковщина, Витебск, Верхнедвинск. Наименьшая частота избыточного увлажнения наблюдается на участках с легкими супесчаными почвами – в пунктах Лынтупы и Сенно. Установлено, что в Белорусском Поозерье существует тенденция к сокращению продолжительности избыточного увлажнения. Тем не менее, несмотря на ряд засушливых лет количество декад с переувлажнением почвы более чем в 2 раза превышает количество декад с засухой, что свидетельствует о преобладании переувлажнения почвы в период вегетации на территории Белорусского Поозерья по сравнению с почвенными засухами.

Ключевые слова: влажность почвы; почвенные засухи; переувлажнение почв; изменение климата.

Для цитирования. Мельник В. И., Буяков И. В., Яцухно В. М., Шумская Т. Г. Оценка увлажнения почв сельскохозяйственных земель Белорусского Поозерья в условиях современного изменения климата // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 15–26.

ASSESSMENT OF SOIL MOISTURE IN AGRICULTURAL LANDS OF BELARUSIAN LAKE DISTRICT IN THE CONTEXT OF MODERN CLIMATE CHANGE

V. I. Melnik¹, I. V. Buyakov¹, V. M. Yatsukhno², T. G. Shumskaya³

¹Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

²Belarussian State University, Minsk, Belarus;

³Republican Center of Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination
and Environmental Monitoring, Minsk, Belarus

Abstract. The article presents research results on soil moisture assessment on agricultural lands of Belarusian Lake District (Poozerye) based on the data of the network of hydrometeorological observations for 1989–2022. The dynamics of productive moisture reserves in the 0–20 cm layer is estimated. The duration of soil droughts and the recurrence of years with soil drought by month in the territory of Belarusian Lake District has been estimated. For the first time, information about waterlogging of the soils of the studied territory has been obtained. Excessive soil moisture is most pronounced in early spring and late autumn periods on heavy and medium loams soils – Yezerishte, Shar-kovshchina, Vitebsk, Verkhnedvinsk. The lowest frequency of excessive moisture is observed in sites on light sandy loam soils – Lyntupy and Senno). It has been established that in Belarusian Lake District there is a tendency to decrease the duration of excessive moisture. Nevertheless, despite a number of dry years, soil waterlogging dominates and is observed in almost all years. The average number of decades with soil waterlogging is more than twice as high as the number of decades with drought, which highlights the predominance of soil waterlogging during the growing season in the territory of Belarusian Lake District compared to soil droughts.

Keywords: soil moisture; soil droughts; soil waterlogging; climate change.

For citation. Melnik V. I., Buyakov I. V., Yatsukhno V. M., Shumskaya T. G. Assessment of soil moisture in agricultural lands of Belarusian Lake District in the context of modern climate change. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 15–26.

Введение. До настоящего времени за рубежом и в странах СНГ основное внимание уделялось изучению факторов, механизмов и закономерностей развития атмосферных (метеорологических) засух. Проявление же почвенной засухи во многом зависит от имеющихся влагозапасов в каждой почвенной разновидности. Формирование и динамика водного режима почв не только зависят от климатических условий, но также определяются рельефом местности, гранулометрическим составом почв и содержанием в них гумуса, генетическими особенностями почвообразования и др. Почва в зависимости от ее водно-физических характеристик обладает свойством смягчения засух и вызываемых ими засушливых явлений [1].

Возникающие неблагоприятные и опасные гидрометеорологические процессы и явления, такие как продолжительные волны тепла, рост температур воздуха, рост экстремальных осадков, атмосферные и почвенные засухи, заморозки и прочие, нередко вызывают резко выраженные внутрисуточные и внутригодовые (междекадные и межсезонные) колебания климатических условий. Негативный характер последних отражается на тепло- и влагообеспеченности территории и приводит к весьма существенной пространственно-временной изменчивости водного режима почв, что вызывает снижение продуктивности сельскохозяйственных земель.

К числу крупных природных регионов Республики Беларусь, характеризующихся и отличающихся вышеуказанными условиями, относится Белорусское Поозерье, расположенное в пределах северной и центральной агроклиматических областей площадью свыше 4,0 млн га. Несмотря на то что регион Белорусского Поозерья находится в зоне достаточного увлажнения, в течение вегетационного периода участились атмосферные засухи, вызванные климатическими изменениями. Согласно разработанному каталогу засух на территории Беларуси, за период 1968–2022 гг. указанные засухи отмечены в 1969, 1971, 1982, 1993–1994, 1999–2002, 2008, 2010, 2013, 2015, 2018, 2021 г., что приводит к снижению урожайности сельскохозяйственных культур на почвах легкого гранулометрического состава и подверженных эрозии. Наличие в структуре сельскохозяйственных земель региона широкого спектра почв – от суглинистых и глинистых (34,2 %) до супесчаных (50,4), песчаных (9,0) и торфяных (6,4 %), обладающих различной водоудерживающей способностью – характеризуется разной степенью уязвимости, т. е. предрасположенными или склонными к климатическим изменениям. Указанный показатель степени уязвимости, с одной стороны, указывает на проявление процессов переувлажнения, а с другой – на проявление засух, позволяет судить о востребованности и необходимости разработки мероприятий для решения задач адаптации и смягчения их негативных последствий изменения климата.

В связи с этим в настоящее время, кроме изучения особенностей изменения климата, становится важной и актуальной оценка количественных показателей содержания продуктивной влаги в почве, начала почвенной засухи и ее продолжительности по территории и во времени, а также оценка переувлажнения почв для выработки конкретных рекомендаций по использованию наиболее уязвимых к засухам и переувлажнению почв.

Цель работы – оценить влажность почв сельскохозяйственных угодий территории Белорусского Поозерья, включающей запасы продуктивной влаги в слое 0–20 см; продолжительность и повторяемость почвенных засух, а также переувлажнение почв.

Материалы и методы исследований. Для количественной характеристики влажности почвы использованы результаты инструментальных наблюдений за влажностью почвы на постоянных наблюдательных полевых участках государственной сети гидрометеорологических наблюдений, входящих в Белорусское Поозерье. Влажность почвы определяли в 11 пунктах гидрометеорологических наблюдений и 50 участках с различными почвенными разновидностями за период 1989–2022 гг. в соответствии с ТКП 17.10-09-2008 (02120) «Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила организации агрометеорологических наблюдений и работ».

Исходными данными для выполнения работы являются запасы продуктивной влаги почвы в слое 0–20 см под сельскохозяйственными культурами на наблюдательных полевых участках государственной сети гидрометеорологических наблюдений. Началом почвенной засухи считали запасы продуктивной влаги 10 мм и менее в слое 0–20 см, началом переувлажнения – запасы продуктивной влаги, превышающие наименьшую полевую влагемкость. Обычно они достигают значений 23–34 мм продуктивной влаги в 20-сантиметровом слое на песчаных и супесчаных почвах и увеличиваются до 49–56 мм продуктивной влаги на суглинистых и глинистых почвах [2]. Повторяемость лет с почвенной засухой определяли как выраженное в процентах частное от деления числа лет, когда наблюдалась почвенная засуха (независимо от числа случаев данного явления) на общее число лет наблюдений. Охват засухами и переувлажнением территории (%) в целом за период май – сентябрь в каждом году определяли как процентное отношение числа пунктов наблюдений, на которых наблюдалась почвенная или сильная почвенная засуха, к общему количеству пунктов наблюдений в области (республике).

Анализ материалов, построение рисунков и таблиц выполнены с применением программного пакета MS Office Excel.

Результаты и их обсуждение. В настоящем исследовании для оценки увлажнения территории использованы запасы продуктивной влаги почвы в слое 0–20 см на наблюдательных полевых участках государственной сети гидрометеорологических наблюдений по станциям Витебской области за период 1989–2022 гг. На рис. 1 приведены значения ежегодных запасов влаги (май – сентябрь), которые определяли в пунктах наблюдений на одних и тех же постоянных полевых участках, что дает возможность оценивать климатообусловленную динамику изменения влагозапасов.

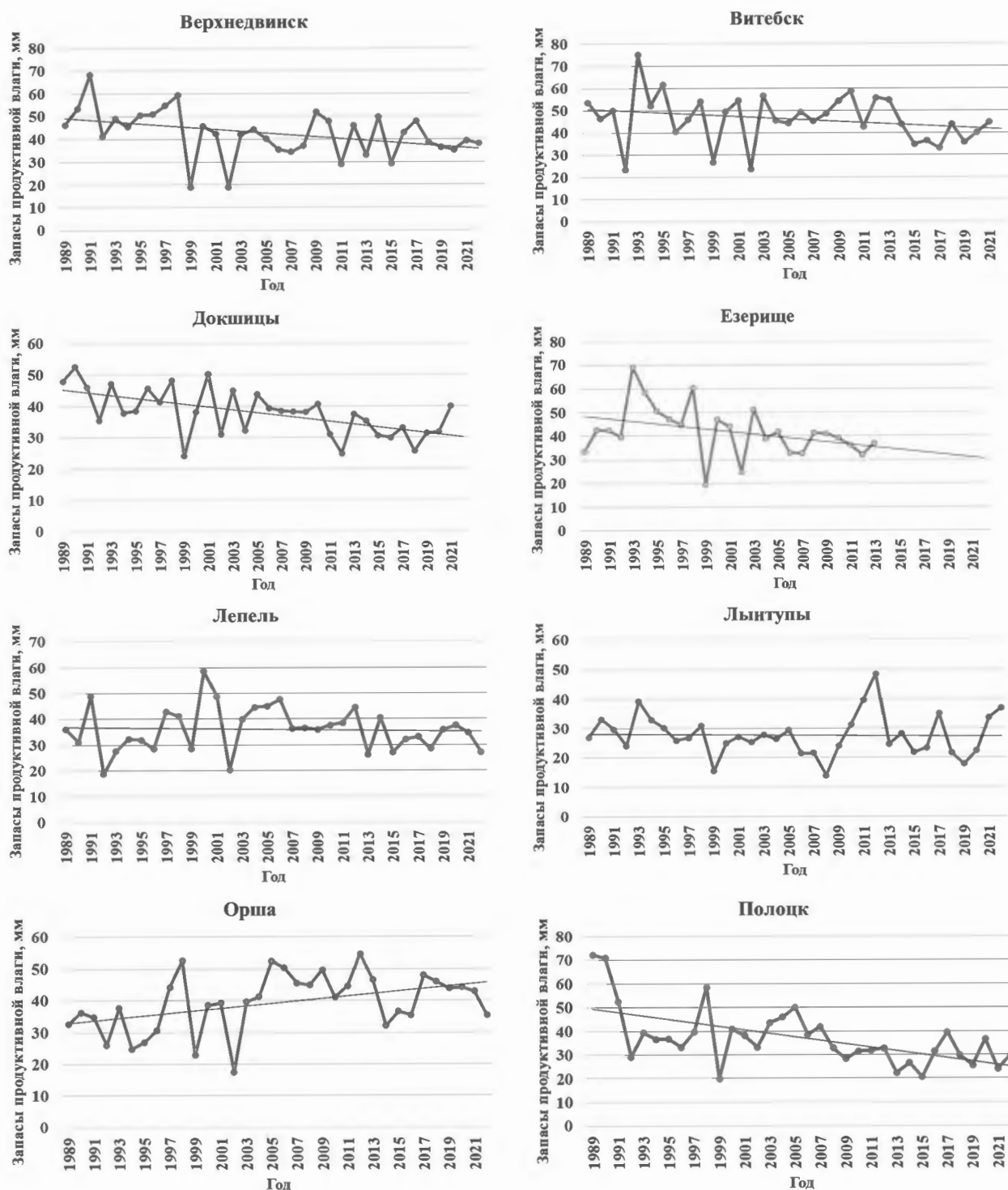
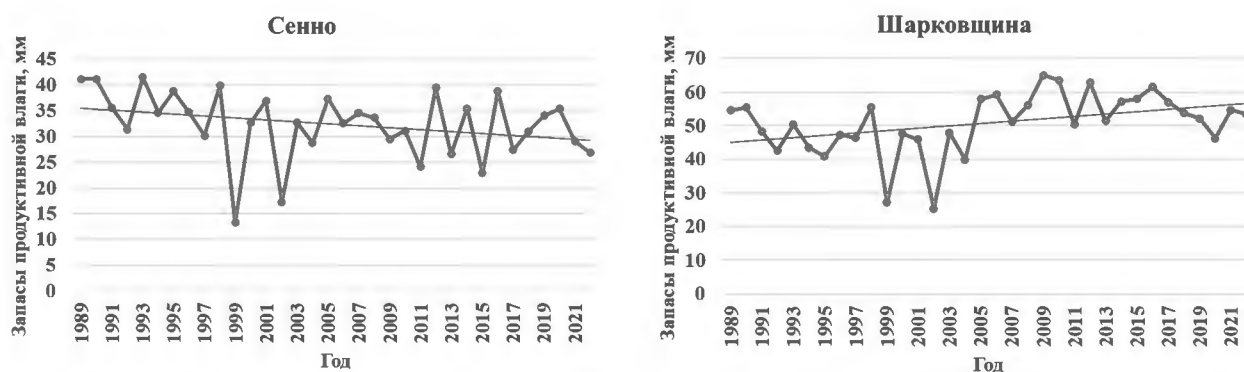


Рис. 1. Изменение продуктивных запасов влаги в слое 0–20 см по пунктам наблюдений в Белорусском Поозерье, 1989–2022 гг.

Fig. 1. Changes in productive moisture reserves in the 0–20 cm layer by observation points in the Belarusian Lake District, 1989–2022



Окончание рис. 1

Ending of fig. 1

На территории Белорусского Поозерья за период потепления в целом за вегетационный период наблюдается тенденция снижения запасов продуктивной влаги в верхнем слое почвы. Наиболее значимое изменение (снижение) запасов продуктивной влаги, рассчитанное по критерию Стьюдента, наблюдается на станциях Верхнедвинск, Докшицы, Полоцк. На других пунктах наблюдений тенденция падения незначима. В Орше, Шарковщине тренд восходящий. Значимый рост запасов влаги в пунктах Шарковщина и Орша нельзя объяснить особыми условиями увлажнения в этих пунктах (количество осадков, испарение и др.), что требует дополнительных исследований. Скорее всего, полученные результаты объясняются сменой постоянных полевых наблюдательных участков (Орша – 2001 г., Шарковщина – 2005 г.). Анализ запасов влаги по годам по пунктам наблюдений территории Белорусского Поозерья показал, что наиболее низкие влагозапасы за 1989–2022 гг. наблюдались в результате почвенных засух в 1992, 1999, 2002, 2015, 2018, 2021 г.

Повторяемость и продолжительность почвенных засух на территории Белорусского Поозерья. Для расчета повторяемости и продолжительности почвенных засух использованы данные влагозапасов всех участков, на которых проводили определение влажности почвы. Использование данных всех участков с различными по механическому составу почвами дает возможность увеличить объемы выборки по влажности почвы и получить более точные данные повторяемости почвенных засух. Началом почвенной засухи в соответствии с установленными критериями считались запасы продуктивной влаги 10 мм и менее в слое 0–20 см хотя бы на одном участке [3]. Эти критерии были взяты за основу при расчетах повторяемости и продолжительности почвенных засух. Почвенная засуха продолжительностью три декады и более подряд считалась сильной почвенной засухой [4]. Повторяемость лет с почвенной засухой определяли как выраженное в процентах частное от деления числа лет, когда наблюдалась почвенная засуха (независимо от числа случаев данного явления), на общее число лет. Результаты расчетов повторяемости засух и сильных засух по пунктам наблюдений Белорусского Поозерья за период (май – сентябрь) приведены на рис. 2.

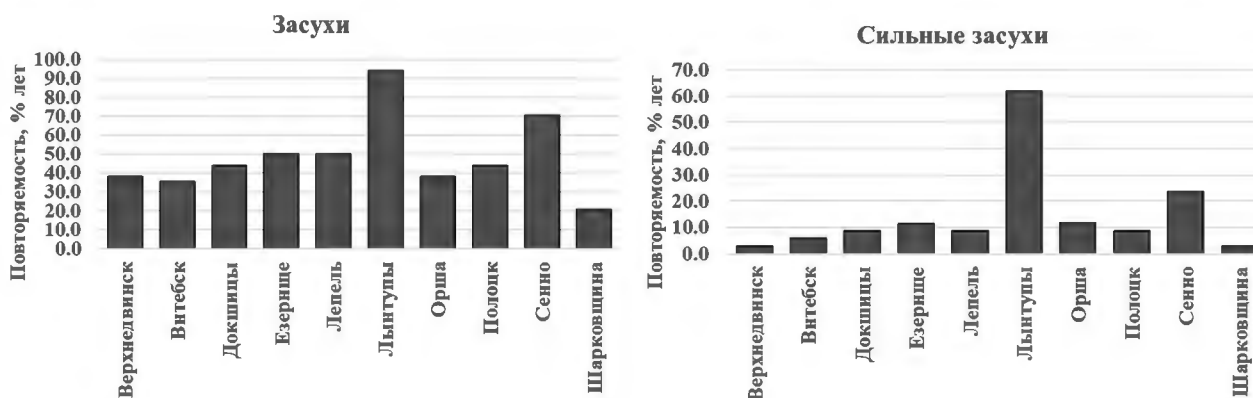


Рис. 2. Повторяемость (%) лет с засухой и сильной засухой в слое 0–20 см за период апрель – октябрь по пунктам наблюдений Белорусского Поозерья

Fig. 2. Recurrence (%) of years with drought and severe drought in the 0–20 cm layer for the period April – October at the observation points of the Belarusian Lake District

Следует отметить, что наибольшая повторяемость почвенных засух в целом за апрель – октябрь наблюдается почти ежегодно (превышает 90 %) в Поставском районе (станция Лынтупы) и вызвана в первую очередь относительно легкими почвами (супесчаными, подстилаемыми песками); в Сенно повторяемость почвенных засух – 70 %, на остальных станциях в пределах 35–50 %. Это существенно ниже чем в Белорусском Полесье, где повторяемость почвенных засух на большинстве пунктов наблюдений находится в пределах 70–90 % [3–5].

Повторяемость засух за период апрель – октябрь в целом дает общую картину распределения засух по территории Белорусского Поозерья Беларуси за период активной вегетации. Вместе с тем представляется важным знать распределение засух по территории (по пунктам наблюдений) и во времени (по месяцам). Наибольшая повторяемость почвенных засух практически во всех пунктах наблюдений в областях отмечается в летние месяцы и, как правило, она сильно выражена в пунктах наблюдений (станциях) с более легкими почвами: Лынтупы, Сенно. В мае на большинстве пунктов наблюдений почвенная засуха отсутствует или не превышает 5 %, за исключением станции Лынтупы (47 %). В третьей декаде апреля на станции Полоцк в 2002 г. отмечен пока единственный случай с почвенной засухой за указанный период наблюдений (рис. 3).

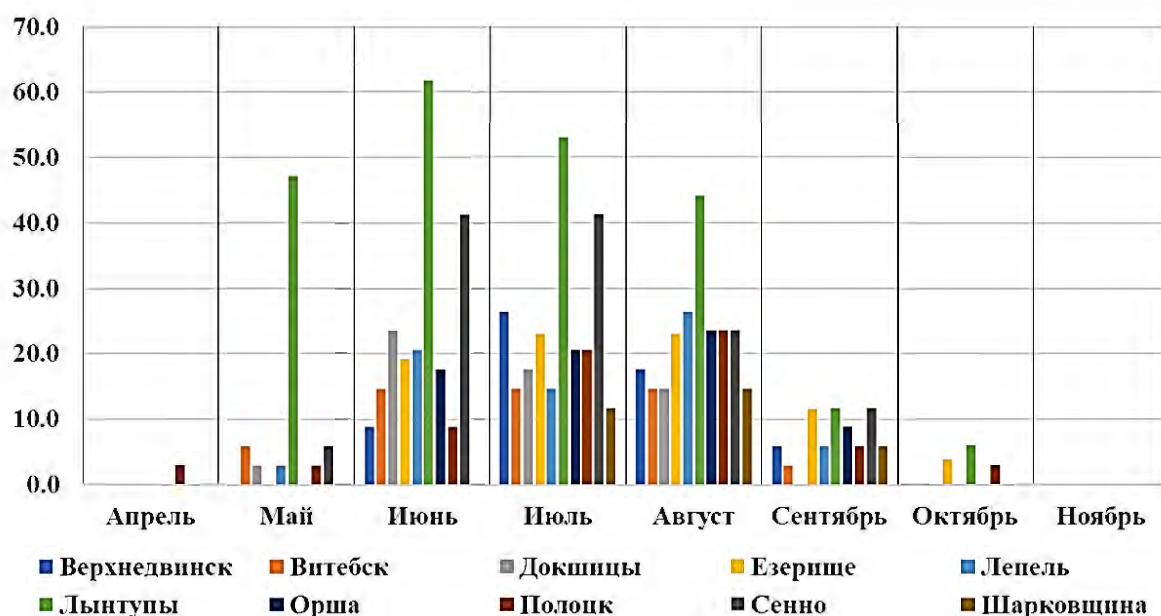


Рис. 3. Повторяемость лет (%) с почвенными засухами в слое 0–20 см по месяцам по пунктам наблюдений Белорусского Поозерья

Fig. 3. Repeatability of years (%) with soil droughts in the 0–20 cm layer by month at the observation points of the Belarusian Lake District

Сильные засухи (продолжительностью месяц и более) на большинстве станций в летние месяцы отсутствуют или находятся в пределах повторяемости – 3–6 %. Так, сильные почвенные засухи наблюдались на большинстве пунктов наблюдений летом в 1992, 1999, 2002, 2011, 2015 г., чаще всего в августе. В мае сильные засухи отмечены только в Поставском районе (станция Лынтупы) (рис. 4).

Следует отметить, что максимальная продолжительность сильных засух – 7 декад за исследуемый период зафиксирована в различные годы в Полоцке (18.07.–18.09.1999), Сенно (18.06.–08.08.1999); 6 декад – в Лынтупах (28.06.–18.08.2020) (табл. 1). Повторяемость лет с засухами приведена в табл. 2.

Как известно, на сельскохозяйственный сектор экономики оказывает влияние не только продолжительность засух, но и их распространение по площади. Охват территории засухами и сильными засухами территории Белорусского Поозерья в целом за период май – сентябрь определяли ежегодно как отношение числа пунктов наблюдений на территории Белорусского Поозерья, на которых наблюдалась почвенная или сильная почвенная засуха, по отношению к общему пункту наблюдений в Белорусском Поозерье, выраженное в процентах (рис. 5). Охват территории рассчитан как среднее из месячных значений охватов за каждый месяц периода май – сентябрь. Полученные результаты показывают, что даже в годы с сильными засухами (1999 и 2002 г.) охват территории

засухами составлял 32–33 %, хотя в отдельные месяцы мог достигать до 100 % (август 1994 г.). В то же время следует отметить, что за 1989–2022 гг. на территории Белорусского Поозерья в 2014 г. (41 %) почвенные засухи отсутствовали.

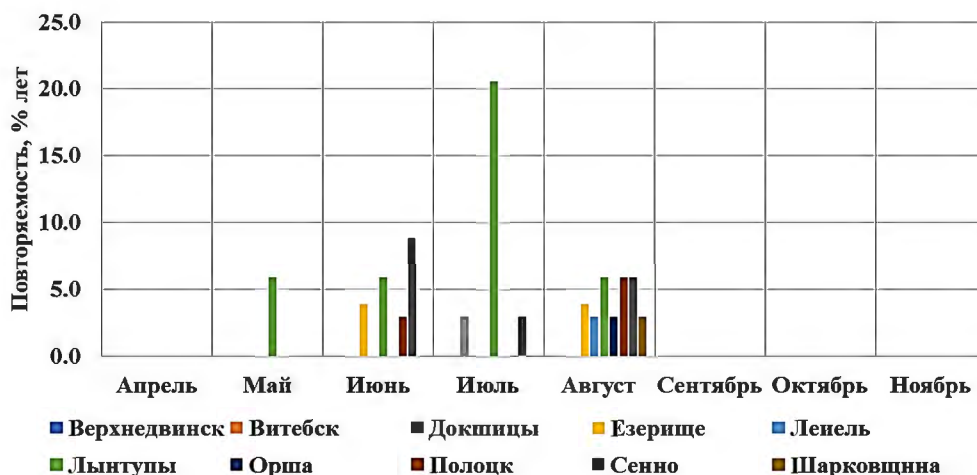


Рис. 4. Повторяемость лет (%) с продолжительными (сильными) засухами в слое 0–20 см по месяцам по пунктам наблюдений Белорусского Поозерья

Fig. 4. Repeatability of years (%) with prolonged (severe) droughts in the 0–20 cm layer by month at the observation points of the Belarusian Lake District

Таблица 1. Максимальная продолжительность сильных засух и их повторяемость по пунктам наблюдений Белорусского Поозерья за период май – октябрь, 1989–2022 гг.

Table 1. The maximum duration of severe droughts and their recurrence according to the observation points of the Belarusian Lake District, the period May – October, 1989–2022

Пункт наблюдений	Максимальная продолжительность засух (в декадах)	Год(ы)	Число случаев с сильными засухами (3 декады и более)	Повторяемость (%) лет с сильными засухами (май – октябрь)
Верхнедвинск	3	2002	1	2,9
Витебск	3	2002, 2010	2	5,9
Докшицы	3	1994, 2012	2	5,9
Езерище	4	2002, 2011	3	8,8
Лепель	4	1992	3	8,8
Лынтупы	6	2020	13	38,2
Орша	5	2002	4	11,8
Полоцк	7	1999	2	5,9
Сенно	7	1999	7	20,6
Шарковщина	5	2002	1	2,9

Таблица 2. Повторяемость (%) лет с сильными засухами в слое 0–20 см по месяцам и за отдельные периоды

Table 2. Repeatability (%) of years with severe droughts in 0–20 cm layer by months and for separate periods

Пункт наблюдений	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Май – октябрь	Сентябрь – октябрь
Верхнедвинск	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0
Витебск	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	0,0
Докшицы	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	5,9	0,0
Езерище	0,0	3,8	0,0	3,8	0,0	0,0	8,8	0,0
Лепель	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	8,8	0,0
Лынтупы	5,8	5,8	20,6	5,9	0,0	0,0	38,2	0,0
Орша	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	11,8	0,0
Полоцк	0,0	2,9	0,0	5,9	0,0	0,0	5,9	0,0
Сенно	0,0	8,8	2,9	5,9	0,0	0,0	20,6	0,0
Шарковщина	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	2,9	0,0

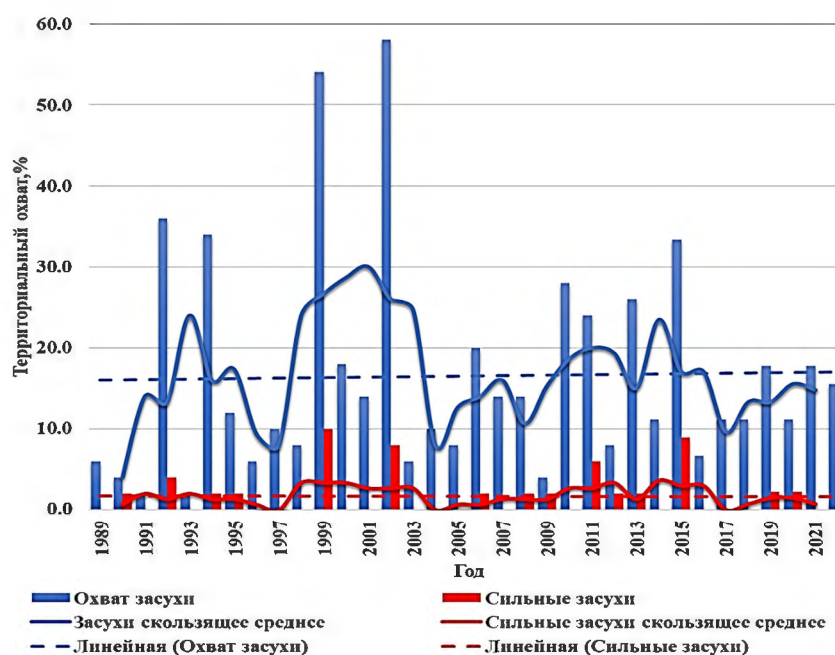


Рис. 5. Охват территории Белорусского Поозерья (%) засухами и сильными засухами за период май – сентябрь, 1989–2022 гг.

Fig. 5. Coverage of the territory of the Belarusian Lake District (%) by droughts and severe droughts for the period May – September, 1989–2022

Самая масштабная месячная засуха наблюдалась на территории Белорусского Поозерья в августе 1994 г., тогда засуха охватила все станции Поозерья (100 %). В среднегодовом разрезе самый высокий охват отмечался в 2002 г. (58 %) и 1999 г. (54 %). Также достаточно значительную территорию засухи охватывали в 1992 г. (36 %), 1994 г. (34 %), 2015 г. (33,3 %) и 2010 г. (28 %). Указанный на рис. 5 охват территории сильными засухами характеризуется довольно низкими значениями. Вызвано это расчетом охвата территории как среднего из месячных значений охватов за каждый месяц периода май – сентябрь, что, на наш взгляд, занижает количество сильных засух. В связи с наблюдаемыми случаями сильных засух в течение трех декад и более подряд, включая и смежные месяцы, охват территории сильными засухами определяли как отношение количества пунктов наблюдений с засухами продолжительностью три декады и более независимо от даты начала и окончания за период май – сентябрь к общему количеству пунктов наблюдений (рис. 6).

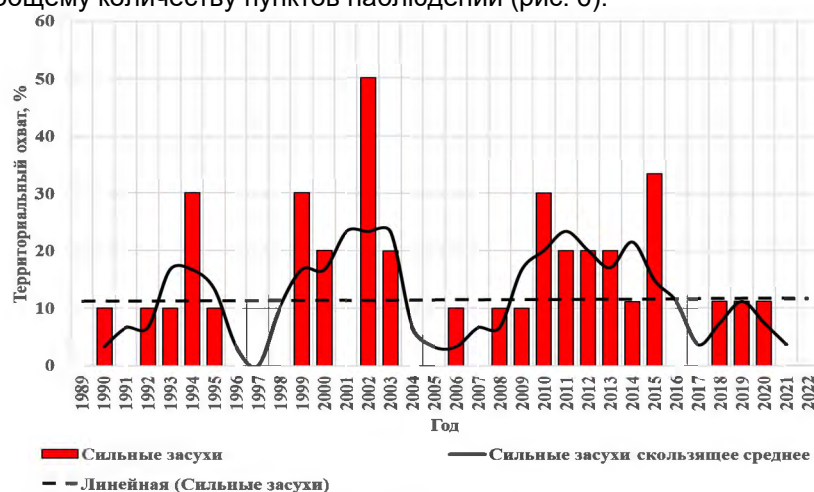


Рис. 6. Охват территории Белорусского Поозерья (%) сильными засухами (продолжительностью три декады подряд и более, независимо от даты начала и окончания) за период май – сентябрь

Fig. 6. Coverage of the territory of the Belarusian Lake District (%) by severe droughts (lasting three consecutive decades or more), regardless of the start and end dates) for the period May – September

Самая масштабная сильная засуха, отмеченная в 2002 г., охватила 50 % территории. Также большие площади охватывались сильными засухами в 2015 г. (33,3 %), 1994, 1999 и 2010 г. (по 30 % территории). Наибольшая продолжительность сильных почвенных засух приведена в табл. 1.

Определенный интерес представляют сведения, приведенные на рис. 7, характеризующие среднее количество декад с засухами, наблюдавшимися на территории Белорусского Поозерья. Не только значительным охватом территории Белорусского Поозерья засухами, но и наибольшей продолжительностью по количеству декад с засухой отличались 1992, 1999, 2002, 2015 г.



Рис. 7. Среднее число декад с засухой и сильной засухой в слое 0–20 см в Белорусском Поозерье, 1989–2022 гг.

Fig. 7. The average number of decades with drought and severe drought in the 0–20 cm layer in the Belarusian Lake District, 1989–2022

В работе [6] для исследования временной структуры изменений территориального охвата засухами и среднего числа засушливых декад за год (цикличности) использовали метод анализа сингулярного спектра (Singular Spectrum Analysis). Данный метод основан на получении из исходного временного ряда выборки из скользящих отрезков заданной длины и применении к ним метода главных компонент. Несмотря на большой объем полученного фактического материала, результаты анализа для обоих показателей оказались во многом схожи. Вид и поведение компонент не претерпевают существенных изменений при переходе от рассмотрения всех случаев засух к рассмотрению только сильных засух (данная особенность во многом верна и для многолетнего хода исходных рядов процента территориального охвата и среднего числа декад с засухами за год). Однако, пожалуй, наиболее примечательным является то, что циклы, выделяемые при анализе изменений территориального охвата, аналогичны циклам, определенным при анализе изменений среднего числа декад с засухой. В целом по территории Беларуси в изменении данных показателей доминирует короткопериодная цикличность продолжительностью 2–3 года. Кроме того, прослеживается более продолжительный цикл в 8–11 лет, но он менее четкий и нередко существует только для второй компоненты; он также реже встречается при рассмотрении показателей сильных засух. Главной особенностью изменений территориального охвата засухами и среднегодового числа декад с засухой в Витебском Поозерье является то, что цикл в 8–11 лет здесь выражен очень слабо, причем хуже всего он прослеживается на графиках показателей сильных засух. Другой важной особенностью региона является то, что здесь, начиная с 2000-х годов, цикличность в изменениях рассматриваемых показателей существенно ослабевает.

Таким образом, можно говорить, что характер изменчивости величин территориального охвата засухами и среднегодового числа декад с засухой по всей территории страны относительно однороден и в нем доминирует короткопериодная циклическая составляющая продолжительностью 2–3 года. Существует также более продолжительный цикл в 8–11 лет с наибольшим повторением засух, и четкость его проявления повышается при продвижении с северо-востока на юго-запад страны; в изменчивости показателей сильных засух этот цикл выражен слабее.

Переувлажнение почвы на территории Белорусского Поозерья. Как уже было сказано выше, почвы всей территории Белорусского Поозерья отличаются значительным разнообразием по механическому составу и большой амплитудой увлажнения. Критерии переувлажнения почв содержатся в работе [2]. Повторяемость лет с избыточным увлажнением почв по декадам по пунктам наблюдений приведена на рис. 8. Как и следовало ожидать, избыточное увлажнение почв наиболее выражено

в ранневесенний и позднесенний период на тяжелых почвах (тяжелые и средние суглинки) – в пунктах Езерище, Шарковщина, Витебск, Верхнедвинск. Наименьшая повторяемость избыточного увлажнения наблюдается в пунктах Лынтупы и Сенно на легких почвах.

Повторяемость (% лет) с избыточным увлажнением почв в слое 0–20 см по месяцам по пунктам наблюдений государственной гидрометеорологической сети Белорусского Поозерья за 1989–2022 гг. характеризуется высокими значениями (до 100 %) на большинстве станций с тяжелыми суглинистыми почвами в ранневесенний (апрель – май) и позднесенний (октябрь – ноябрь) периоды (см. рис. 8).

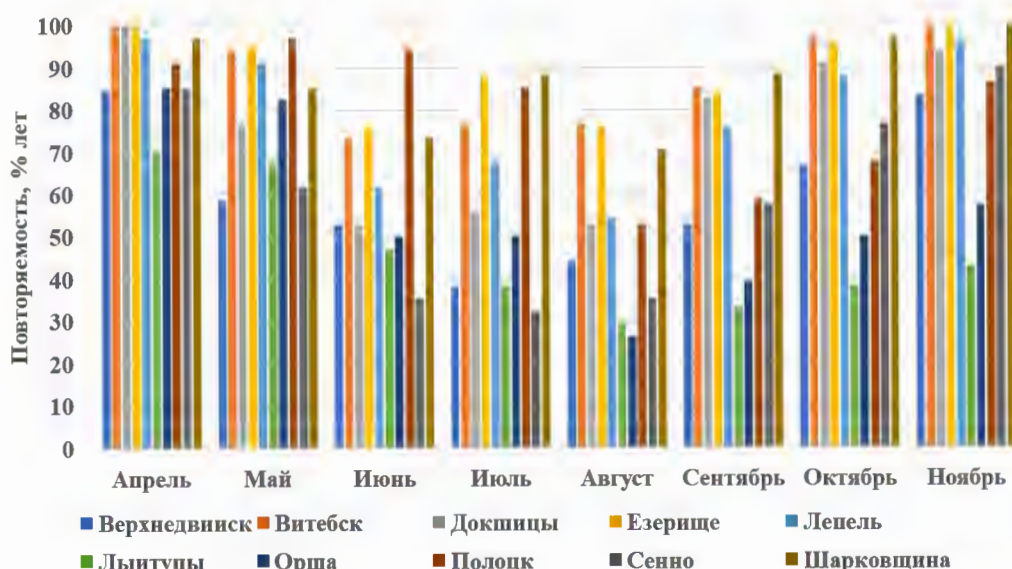


Рис. 8. Повторяемость (% лет) с избыточным увлажнением почв в слое 0–20 см по месяцам по пунктам наблюдений государственной гидрометеорологической сети Белорусского Поозерья, 1989–2022 гг.

Fig. 8. Repeatability (% of years) with excessive soil moisture in the 0–20 cm layer by month at the observation points of the state hydrometeorological network of the Belarusian Lake District, 1989–2022

Аналогично засухам были выполнены исследования и построены графики динамики среднего числа декад с переувлажнением почв и процента охвата территории с переувлажненными почвами за май – сентябрь по годам за период 1989–2022 гг. (рис. 9, 10).



Рис. 9. Охват территории Белорусского Поозерья (%) с избыточным увлажнением почв в слое 0–20 см. Охват территории рассчитан как среднее из месячных значений охватов за каждый месяц периода май – сентябрь

Fig. 9. Coverage of the territory of the Belarusian Lake District (%) by excessive soil moisture in the 0–20 cm layer. The coverage of the territory is calculated as the average of the monthly coverage values for each month of the period May – September

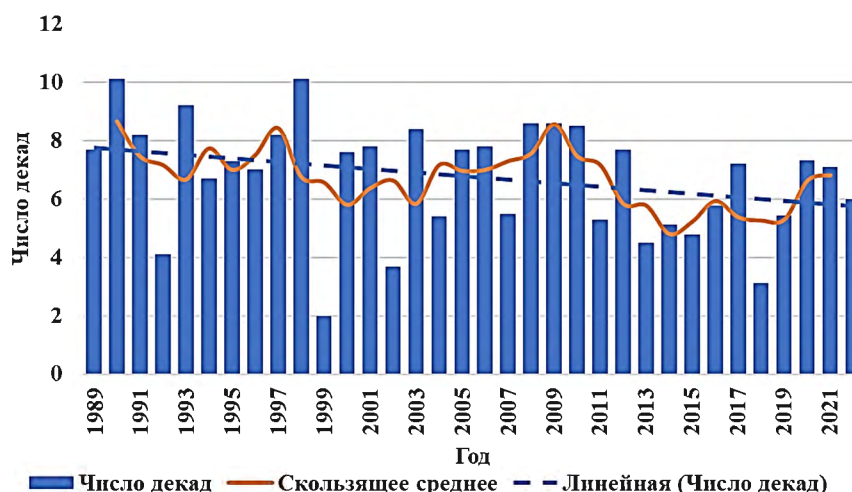


Рис. 10. Динамика средней продолжительности (число декад) избыточного увлажнения за период май – сентябрь в слое 0–20 см на территории Белорусского Поозерья

Fig. 10. Dynamics of the average duration (number of decades) of excessive moisture in the period May – September in a layer of 0–20 cm on the territory of the Belarusian Lake District

Расчеты процента охвата территории с переувлажненными почвами за май – сентябрь по годам за период 1989–2022 гг. показали, что практически во все годы за указанный период наблюдалось переувлажнение почв. Даже в очень засушливые годы процент охвата территории за счет ранневесеннего и позднесеннего переувлажнения территории не опускался ниже 20 % (1999 и 2018 г.). В отличие от почвенных засух повторяемость лет с переувлажнением и процент охвата территории Белорусского Поозерья переувлажнением гораздо выше. Так, за 1989–2022 гг., несмотря на ряд засушливых лет на территории Белорусского Поозерья, переувлажнение почв доминирует и происходит практически во все годы. В то же время в Белорусском Поозерье наблюдается тенденция снижения продолжительности избыточного увлажнения. Статистика трендов продолжительности избыточного увлажнения в слое 0–20 см говорит об их незначимом падении, что, впрочем, характерно для других регионов Беларуси. Анализ среднего числа декад с переувлажнением почв показывает, что оно более чем в 2 раза превышает число декад с засухой, а это подчеркивает преобладание во времени переувлажнения почв на территории Белорусского Поозерья по сравнению с почвенными засухами.

Выводы.

1. На территории Белорусского Поозерья за период потепления в целом наблюдается тенденция снижения запасов продуктивной влаги в верхнем слое почвы. Наиболее низкие влагозапасы за 1989–2022 гг. наблюдались в результате почвенных засух в 1992, 1999, 2002, 2015, 2018 г. Наиболее значимое изменение (снижение) запасов продуктивной влаги, рассчитанное по критерию Стьюдента, наблюдается на станциях Верхнедвинск, Докшицы, Полоцк.

2. Наибольшая повторяемость почвенных засух практически во всех пунктах наблюдений в областях отмечается в летние месяцы и, как правило, она сильно выражена в пунктах наблюдений (станциях) с более легкими почвами: Лынтупы, Сенно. В мае на большинстве пунктов наблюдений почвенная засуха отсутствует или не превышает 5 %, за исключением станций Лынтупы (47 %). В третьей декаде апреля 2002 г. на станции Полоцк отмечен пока единственный случай с почвенной засухой (апрель) за указанный период наблюдений.

4. Сильные засухи (продолжительностью месяц и более) на большинстве станций в летние месяцы отсутствуют или находятся в пределах повторяемости – 3–6 %. Наибольшая повторяемость сильных засух за май – октябрь отмечена на станциях Лынтупы – 38,2 %, Сенно – 20,6, Орша – 10,8 %. Максимальная продолжительность сильных засух за исследуемый период – 7 декад зафиксирована в различные годы в пунктах Полоцк и Сенно (1999 г.), 6 декад – в пункте Лынтупы (2020 г.).

5. В Белорусском Поозерье наблюдается слабая тенденция роста охвата территории засухами. В годы с сильными засухами (1999, 2002) в целом охват территории засухами составлял 54–58 %, хотя в отдельные месяцы мог достигать до 100 % (август 1994 г.). В то же время следует отметить, что за 1989–2022 гг. на территории Белорусского Поозерья в 2014 г. (41 %) почвенные засухи отсутствовали.

6. Характер изменчивости величин территориального охвата засухами и среднегодового числа декад с засухой по всей территории страны относительно однороден, в нем доминирует короткопериодная циклическая составляющая продолжительностью 2–3 года. Существует также более продолжительный цикл в 8–11 лет с наибольшим повторением засух, и четкость его проявления повышается при продвижении с северо-востока на юго-запад страны; в изменчивости показателей сильных засух этот цикл выражен слабее или отсутствует.

7. В целом на территории Белорусского Поозерья наблюдается тенденция снижения переувлажнения почв. Избыточное увлажнение почв наиболее выражено в ранневесенний и позднеосенний периоды на тяжелых почвах (тяжелые и средние суглинки) станций Езерище, Шарковщина, Витебск, Верхнедвинск. Наименьшая повторяемость избыточного увлажнения наблюдается в пунктах Лынтупы, Сенно.

8. Среднее число декад с переувлажнением более чем в 2 раза превышает число декад с засухой, что подкрепляет преобладание во времени переувлажнения почв на территории Белорусского Поозерья по сравнению с почвенными засухами.

Список использованных источников

1. Червань, А. Н. Оценка и внутрорегиональные различия уязвимости почв сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья к засухам в условиях потепления климата / А. Н. Червань, В. И. Мельник, В. М. Яцухно // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 4. – С. 444–453.
2. Агрогидрологические свойства почв Белорусской ССР / Материалы гидрометеорологических наблюдений // Минская гидрометеорологическая обсерватория. – Минск, 1977. – 332 с.
3. Почвенные засухи на территории Беларуси в условиях изменения климата / В. И. Мельник, М. А. Хитриков, И. В. Буяков, Т. Г. Шумская // Природные ресурсы – 2023. – № 2. – С. 12–21.
4. 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.
5. Оценка влагозапасов и повторяемости почвенных засух на территории Белорусского Полесья в условиях современного изменения климата / В. И. Мельник, И. В. Буяков, Н. Г. Пискунович, Т. Г. Шумская // Природные ресурсы. – 2020. – № 2. – С. 104–115.
6. Диагноз, моделирование и прогнозирование естественных и антропогенных изменений климата с целью оценки их воздействий на окружающую среду и условия жизнедеятельности населения Беларуси : отчет о НИР (промежуточ.) : ГПНИ Природные ресурсы и окружающая среда подпрограмма 10.1 «Природные ресурсы и их рациональное использование», задание № 1.04 «Модельные оценки влияния процессов обводнения и заболачивания территорий Беларуси на микроклимат прилегающей местности». – Минск, 2023. – Гл. 3. – С. 82–83.

References

1. Chervan' A. N., Melnik V. I., Yatsukhno V. M. *Otsenka i vnutriregional'nyye razlichiya uyazvimosti pochv sel'sk Khozaystvennykh zemel' Belorusskogo Poles'ya k zasukham v usloviyakh potepleniya klimata* [Assessment and intraregional differences in the vulnerability of the Belarusian Polesie croplands to droughts in the context of global warming]. *Doklady Natsional'noy akademii nauk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 4, pp. 444–453. (in Russian)
2. *Agrogidrologicheskiye svoystva pochv Belorusskoy SSR* [Agrohydrological properties of soils of the Byelorussian SSR]. *Materialy gidrometeorologicheskikh nablyudeniye* [Hydrometeorological observation materials]. *Minskaya gidrometeorologicheskaya observatoriya* [Minsk Hydrometeorological Observatory]. Minsk, 1977, 332 p. (in Russian)
3. Melnik V. I., Khitrykau M. A., Buyakov I. V., Shumskaya T. G. *Pochvennyye zasukhi na territorii Belarusi v usloviyakh izmeneniya klimata* [Soil droughts in Belarus under climate change conditions]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2023, no. 2, pp. 12–21. (In Russian)
4. Melnik V. I., Piskunovich N. G., Buyakov I. V., Yatsukhno V. M., Shumskaya T. G. *Prostranstvenno-vremennyye izmeneniya pochvennykh zasukh na territorii Belorusskogo Poles'ya v usloviyakh sovremennogo izmeneniya klimata* [The spatio-temporal pattern of soil droughts on the territory of the Belarusian Polesie in accordance with current climate change]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2021, no. 1, pp. 15–21. (in Russian)
5. Melnik V. I., Buyakov I. V., Piskunovich N. G., Shumskaya T. G. *Otsenka vlagozapasov i povtoryayemosti pochvennykh zasukh na territorii Belorusskogo Poles'ya v period sovremennogo potepleniya klimata* [Assessment of moisture reserves and recurrence of soil droughts in the territory of the Belarusian Polesie during the period of modern climate warming]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2020, no. 2, pp. 104–115. (in Russian)

6. *Otchet o NIR "Diagnoz, modelirovaniye i prognozirovaniye yestestvennykh i antropogennykh izmeneniy klimata s tsel'yu otsenki ikh vozdeystviy na okruzhayushchuyu sredu i usloviya zhiznedeyatel'nosti naseleniya Belarusi". GPNI Prirodnyye resursy i okruzhayushchaya sreda podprogramma 10.1 "Prirodnyye resursy i ikh ratsional'noye ispol'zovaniye", zadaniye № 1.04 "Model'nyye otsenki vliyaniya protsessov obvodneniya i zabolachivaniya territoriy Belarusi na mikroklimat prilegayushchey mestnosti" (promezhutoch.)* [Report on the research work "Diagnosis, modeling and forecasting of natural and anthropogenic climate changes in order to assess their impact on the environment and living conditions of the population of Belarus". State Program for Scientific Research Natural Resources and the Environment, subprogram 10.1 "Natural Resources and Their Rational Use", task No. 1.04 "Model assessments of the impact of flooding and swamping processes in the territories of Belarus on the microclimate of the adjacent area" (interim)]. Minsk, 2023, chapter 3, pp. 82–83. (In Russian)

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

Буюков Иван Васильевич – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: buyakov-ivan@mail.ru

Яцухно Валентин Минович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией экологии ландшафтов, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: yatsukhno@bsu.by

Шумская Татьяна Григорьевна – ведущий инженер-агрометеоролог, ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (Белгидромет) (пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь). E-mail: apm_agro@hmc.by

Information about the authors

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

Ivan V. Buyakov – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: buyakov-ivan@mail.ru

Valentin M. Yatsukhno – Ph. D. (Agriculture), Associate Professor, Head of the Scientific Research Lab of Landscape Ecology, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: yatsukhno@bsu.by

Tatiana G. Shumskaya – Leading Engineer-Agrometeorologist, State Institution "Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring" (Belhydromet), (110, Nezavisimosti Ave., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: apm_agro@hmc.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-27-37>
УДК 551.513+551.55(476)

Поступила в редакцию 18.02.2025
Received 18.02.2025

КОЛЕБАНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ И ИЗМЕНЕНИЕ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

А. А. Волчек¹, А. В. Гречаник²

¹Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь;

²Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина, Брест, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрено влияние форм атмосферной циркуляции по Вангенгейму – Гирсу на ветровой режим территории Беларуси. Построены картосхемы среднегодовых скоростей ветра для циркуляционных эпох. Для меридиональной циркуляционной эпохи наиболее характерными являются среднегодовые скорости ветра от 3,81 до 4,20 м/с, при восточной форме циркуляции – от 3,01 до 3,60, при западной форме – от 2,41 до 3,20 м/с. Поля среднегодовых скоростей ветра при восточной и западной формах атмосферной циркуляции схожи. Анализ статистической значимости различий среднегодовых скоростей ветра между циркуляционными эпохами показал значимые различия между всеми сравниваемыми периодами.

В результате анализа выборочных средних повторяемостей направлений ветра по восьми румбам между E + C и E циркуляционными эпохами максимальные различия (70,59 %) характерны для южного направления ветра, доля которого при восточной циркуляционной эпохе значительно увеличивается. Между E + C и W циркуляционными эпохами различия в повторяемости направлений ветра выражены более ярко: максимальные различия характерны для юго-восточного (76,47 %) и южного (82,35 %) направлений. Различия между изменчивостью направлений ветра E и W циркуляционных эпох выражены слабее.

Ключевые слова: циркуляция атмосферы Вангенгейма – Гирса; скорость и направление ветра; изменение ветрового режима.

Для цитирования. Волчек А. А., Гречаник А. В. Колебания атмосферной циркуляции и изменение ветрового режима на территории Беларуси // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 27–37.

VARIABILITY OF ATMOSPHERIC CIRCULATION AND CHANGES IN THE WIND REGIME OF THE TERRITORY OF BELARUS

A. A. Volchek¹, A. V. Hrachanik²

¹Brest State Technical University, Brest, Belarus;

²Brest State A. S. Pushkin University, Brest, Belarus

Abstract. The paper considers the influence of atmospheric circulation forms according to Wangenheim – Girs on the wind regime of the territory of Belarus. Maps of average annual wind speeds for circulation epochs are constructed. For the meridional circulation epoch, the most typical are average annual wind speeds from 3.81 to 4.20 m/s, with the eastern circulation form – from 3.01 to 3.60, with the western form – from 2.41 to 3.20 m/s. The fields of average annual wind speeds for the eastern and western forms of atmospheric circulation are similar. The analysis of the statistical significance of the differences in average annual wind speeds between circulation epochs showed significant differences between all circulation epochs.

As a result of the analysis of the sample average repeatability of wind directions for eight rhumbas between the E + C and E circulation epochs, the maximum differences (70.59 %) are characteristic of the southern wind direction, the share of which significantly increases during the eastern circulation epoch. Between the E + C and W epochs, the differences in the repeatability of wind directions are expressed more clearly: the maximum differences are characteristic of the southeastern (76.47 %) and southern (82.35 %) directions. The differences between the variability of wind directions between the E and W circulation epochs are expressed less clearly.

Keywords: Belarus; Wangenheim – Girs atmospheric circulation; wind speed and direction; wind regime changes.

For citation. Volchek A. A., Hrachanik A. V. Variability of atmospheric circulation and changes in the wind regime of the territory of Belarus. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 27–37.

Введение. В настоящее время одной из актуальных проблем климатологии является оценка наблюдаемых изменений климата, определяемых в первую очередь ростом среднегодовой температурой воздуха. Исследованием изменения приземной температуры воздуха как индикатора изменения климата занимались многие исследователи [1–3]. Кроме приземной температуры воздуха, важным фактором изменения климата является режим атмосферной циркуляции, который влияет на другие метеорологические характеристики (скорость и направление ветра, температуру, влажность и др.) [4, 5].

Атмосферная циркуляция определяет межширотный обмен теплыми и холодными воздушными массами и влагой. Особый интерес представляет исследование взаимосвязи изменчивости форм циркуляции и ветрового режима. Для территории Беларуси данная проблема исследована недостаточно полно, и для получения объективной картины такой взаимосвязи необходимо проведение дополнительных исследований.

Объектом исследования является территория Беларуси, предметом исследования – изменчивость ветрового режима.

Цель работы – исследовать временную изменчивость характеристик поля ветра в связи с изменением циркуляции атмосферы в 1949–2020 гг. и дать оценку их взаимосвязи.

Материалы и методы исследования. Информационную базу для проведения исследования составили данные многолетних инструментальных наблюдений за скоростью и направлением ветра на 17 метеорологических станциях, опубликованные в Государственном климатическом кадастре Департамента по гидрометеорологии Республиканского центра Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, за период 1949–2020 гг.

Классификация форм циркуляции атмосферы Вангенгейма – Гирса для приатлантической части Арктики основана на понятии элементарного синоптического процесса (ЭСП), введенного Г. Я. Вангенгеймом. ЭСП – промежуток времени, в течение которого остаются постоянными распределение давления и направление основных теплых и холодных воздушных течений [6, 7]. В данной классификации выделено 26 типов ЭСП, обобщенных в 3 типа циркуляции (группы макропроцессов): западную (W), восточную (E), меридиональную (C). Выделенные формы учитывают характер длинных термобарических волн в толще тропосферы через траектории барических образований и направление барических и термобарических градиентов. Каждой форме атмосферной циркуляции соответствует собственные преобладающие траектории перемещения циклонов, изменяющиеся от холодного к теплomu сезону [8].

Основным фактором, формирующим ветровой режим на территории Беларуси, является общая циркуляция атмосферы над континентом Евразия и над Атлантикой. Последняя определяется наличием стационарных барических центров: Исландского минимума, Азорского максимума и сезонного зимнего Сибирского максимума. Вся территория Беларуси на протяжении всего года расположена севернее полосы высокого атмосферного давления – оси Воейкова. Зимой к северу от этой оси в большинстве случаев дуют юго-западные и западные ветры, а летом – северо-западные и западные. Преобладающие в течение года потоки воздуха западных направлений приносят на территорию Беларуси господствующий в течение всех сезонов атлантический воздух умеренных широт, проникновение которого связано с циклонической деятельностью на полярном или арктическом фронте. При прочих направлениях ветров в соответствии с сезонами года расширяется область распространения континентальных умеренных, арктических или тропических воздушных масс, которые в формировании климата Беларуси играют меньшую роль. Изменение ветрового режима влечет за собой значительные климатические изменения.

В качестве характеристик атмосферной циркуляции нами были использованы формы атмосферной циркуляции по классификации Вангенгейма – Гирса.

Для исследования особенностей изменения ветрового режима Беларуси основной интерес представляют формы циркуляции в атлантико-евразийском секторе. В работах [9, 10] выделены следующие эпохи атмосферной циркуляции: 1949–1964 гг. (E + C), 1965–1988 гг. (E), 1989–2011 гг. (W), 2011–2020 гг. (E).

Типизация атмосферных процессов Вангенгейма – Гирса учитывает характер длинных термобарических волн, наблюдаемых в тропосфере и нижней части стратосферы и связанных с ними особенностей распределения метеорологических полей. При процессах W формы в тропосфере наблюдаются быстро смещающиеся с запада на восток волны небольшой амплитуды. Для таких процессов характерен как зональный перенос воздуха, так и перенос с некоторым возмущением зонального потока. Таким образом, при W циркуляции формируются зонально расположенные области положительных и отрицательных аномалий метеорологических элементов. В холодное время года при W циркуляции перемещения циклонов осуществляются в зоне между центрами областей низкого давления и отрицательными аномалиями давления. В теплое время года в западных частях гребней – на восток и юго-восток, и расположены зонально [8].

Е и С формы циркуляции характеризуют развитие двух типов меридиональных движений в атмосфере. При формировании указанных форм циркуляции в толще тропосферы им соответствуют стационарные волны с большой амплитудой. Устойчивое положение высотных гребней и ложбин обуславливает длительное сохранение знака адвекции, характера дивергенции и конвергенции и вертикальных движений воздуха в районе. Это приводит к формированию под восточными частями высотных гребней меридионального расположенных областей положительных аномалий давления, а под западными частями высотных гребней – отрицательных аномалий давления воздуха. При Е циркуляции хорошо развита меридиональность, которая прослеживается в расположении траекторий циклонов. Смещение циклонов в западных частях высотных гребней происходит на северо-восток, а в восточных частях гребней – на юго-восток. Циклоны огибают высотный гребень над Британскими островами, смещаются на северо-восток, достигают Гренландского и Баренцева морей. При С циркуляции траектории перемещения циклонов проходят от восточного побережья Северной Америки, огибая Гренландию, до Баренцева и Гренландского морей, с последующим вторжением на территорию Европы и европейской части России [8, 11].

Особый интерес представляют исследования различий скорости и направления ветра в разные циркуляционные эпохи. На протяжении периода исследования доминирующей формой циркуляции была Е (суммарно 34 года). При анализе временных рядов для оценки различий в статистических параметрах мы использовали t -критерий Стьюдента и F -критерий Фишера:

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{n_x \hat{\sigma}_x^2 + n_y \hat{\sigma}_y^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y - 2)}{n_x + n_y}}, \quad (1)$$

$$F = \frac{\hat{\sigma}_x^2}{\hat{\sigma}_y^2}, \quad (2)$$

где \bar{x}, \bar{y} – выборочные средние; $\hat{\sigma}_x^2, \hat{\sigma}_y^2$ – выборочные дисперсии; n_x, n_y – объемы выборок.

Полученное значение t -критерия Стьюдента и F -критерия Фишера сравнивали с их критическими значениями при заданном уровне значимости $\alpha = 5\%$. Если $t > t_\alpha$, принимается гипотеза статистического различия двух выборочных средних, а при $F > F_\alpha$ – гипотеза статистического различия в колебаниях рассматриваемых рядов [12].

Результаты и их обсуждение. В результате анализа выборочных средних среднегодовых скоростей ветра между всеми циркуляционными эпохами выявлены статистически значимые различия. Так между Е + С и Е эпохами статистически значимые различия в среднегодовой скорости ветра отмечены в 70,59 % случаев, между Е + С и W – в 88,24, а между Е и W эпохами – в 76,47 % случаев (табл. 1). Из всех исследуемых метеорологических станций только на станции Могилёв не выделено статистически значимых различий. На станциях Гродно и Верхнедвинск выделены различия только между одной парой циркуляционных эпох, а на станциях Брагин, Новогрудок, Марына Горка и Полоцк – между двумя парами эпох. На 10 из 17 метеорологических станций статистически значимые различия в среднегодовой скорости ветра отмечены для всех циркуляционных эпох.

Таблица 1. Эмпирические значения t -критериев Стьюдента и F -критериев Фишера для среднегодовых скоростей ветра

Table 1. Empirical values of Student's t -tests and Fisher's F -tests for average annual wind speeds

Метеостанция	Средняя скорость	Форма циркуляции		
		Е + С / Е	Е + С / W	Е / W
Барановичи	Е + С = 3,86 Е = 3,57 W = 3,23	$t = 2,22$ $F = 2,61$	$t = 5,60$ $F = 2,17$	$t = 2,74$ $F = 5,66$
Брест	Е + С = 3,38 Е = 2,73 W = 2,55	$t = 9,73$ $F = 3,34$	$t = 11,54$ $F = 2,68$	$t = 2,25$ $F = 1,25$
Пинск	Е + С = 3,75 Е = 3,44 W = 2,26	$t = 1,89$ $F = 5,35$	$t = 12,74$ $F = 1,46$	$t = 6,94$ $F = 7,79$
Брагин	Е + С = 3,33 Е = 3,16 W = 2,56	$t = 1,19$ $F = 1,77$	$t = 5,33$ $F = 1,36$	$t = 4,27$ $F = 1,30$

Метеостанция	Средняя скорость	Форма циркуляции		
		E + C / E	E + C / W	E / W
Василевичи	E + C = 3,16 E = 2,48 W = 1,97	$t = 6,59$ $F = 2,69$	$t = 14,10$ $F = 1,69$	$t = 5,73$ $F = 4,54$
Гомель	E + C = 3,98 E = 3,03 W = 2,41	$t = 5,00$ $F = 3,39$	$t = 10,88$ $F = 1,76$	$t = 3,75$ $F = 5,97$
Гродно	E + C = 3,61 E = 3,79 W = 3,60	$t = 1,60$ $F = 1,09$	$t = 0,01$ $F = 1,02$	$t = 1,81$ $F = 1,07$
Лида	E + C = 3,72 E = 3,05 W = 2,70	$t = 5,12$ $F = 8,04$	$t = 9,95$ $F = 2,45$	$t = 2,39$ $F = 3,28$
Новогрудок	E + C = 3,94 E = 3,90 W = 3,63	$t = 0,49$ $F = 2,05$	$t = 2,64$ $F = 1,87$	$t = 2,35$ $F = 1,10$
Марьина Горка	E + C = 4,10 E = 3,22 W = 2,96	$t = 5,84$ $F = 9,95$	$t = 12,67$ $F = 1,26$	$t = 1,72$ $F = 7,91$
Минск	E + C = 4,01 E = 2,64 W = 2,19	$t = 7,61$ $F = 1,69$	$t = 11,92$ $F = 2,85$	$t = 3,41$ $F = 4,82$
Горки	E + C = 4,12 E = 3,89 W = 3,39	$t = 2,23$ $F = 1,64$	$t = 6,46$ $F = 1,52$	$t = 4,81$ $F = 1,08$
Могилёв	E + C = 3,75 E = 3,86 W = 3,76	$t = 1,06$ $F = 1,07$	$t = 0,13$ $F = 1,51$	$t = 1,21$ $F = 1,41$
Верхнедвинск	E + C = 3,14 E = 3,04 W = 2,88	$t = 0,94$ $F = 1,53$	$t = 2,31$ $F = 1,34$	$t = 1,62$ $F = 2,05$
Витебск	E + C = 4,23 E = 3,12 W = 2,50	$t = 6,27$ $F = 14,76$	$t = 15,52$ $F = 2,82$	$t = 3,30$ $F = 5,24$
Полоцк	E + C = 4,10 E = 2,63 W = 2,47	$t = 10,15$ $F = 2,67$	$t = 12,57$ $F = 1,14$	$t = 1,23$ $F = 2,35$
Шарковщина	E + C = 4,18 E = 3,14 W = 2,56	$t = 6,26$ $F = 5,60$	$t = 12,81$ $F = 1,45$	$t = 3,55$ $F = 3,85$

П р и м е ч а н и е. Полу жирным шрифтом выделены статистически значимые критерии.

Статистически значимые различия характера колебания скорости ветра между циркуляционными эпохами E + C и E, а также E и W наблюдаются в 58,82 % случаев, а между E + C и W они выражены значительно слабее и отмечаются только в 23,53 % случаев. На метеорологических станциях Брагин, Гродно, Новогрудок, Горки и Могилёв различий в характере колебаний не выявлено.

Для наглядного представления пространственного распределения поля скоростей ветра в различные циркуляционные эпохи нами с использованием программных средств QGIS 3.28.1 и SAGA GIS 7.8.2 построены картосхемы среднегодовых скоростей ветра для каждой эпохи (рис. 1). В ходе построения нами разработана единая цветовая шкала для всех картосхем, что позволяет более наглядно отразить полученные результаты.

Наибольшие скорости ветра характерны для меридиональной циркуляционной эпохи, когда для большей части территории Беларуси наиболее характерными являются среднегодовые скорости ветра от 3,81 до 4,20 м/с. В поле распределения скорости ветра максимальные значения отмечаются на северо-востоке республики, а минимальные скорости ветра – на крайнем севере и юго-востоке. При восточной форме циркуляции для Беларуси наиболее характерны скорости ветра от 3,01 до 3,60 м/с. При западной форме циркуляции для исследуемой территории наиболее характерны среднегодовые скорости ветра от 2,41 до 3,20 м/с. При этом поля среднегодовых скоростей ветра при восточной и западной формах атмосферной циркуляции схожи: максимальные значения отмечаются на западе и востоке страны, минимальные значения – на юго-востоке, и проходят полосой от центра к северу республики.

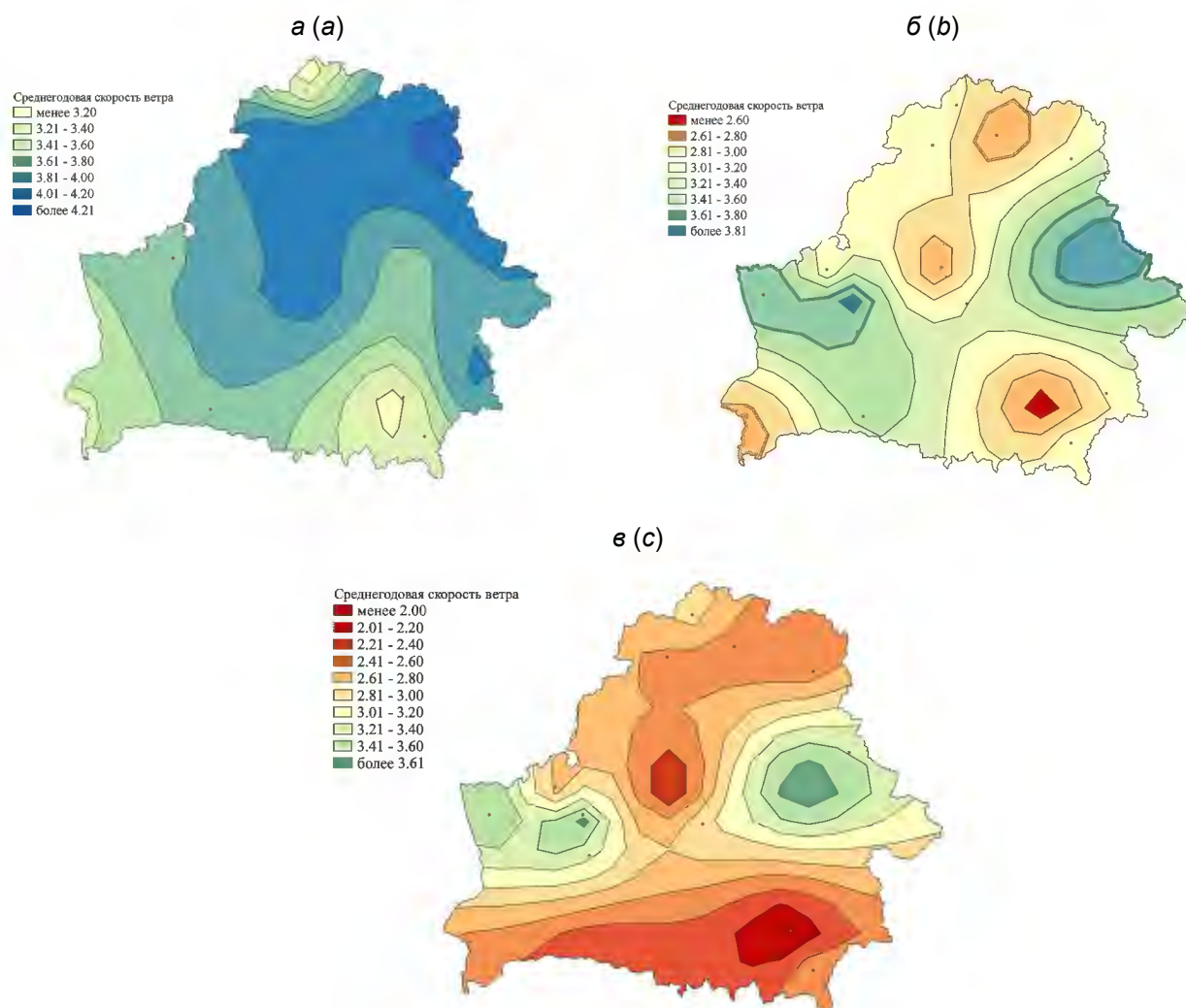


Рис. 1. Среднегодовые скорости ветра (м/с) осредненные за разные циркуляционные эпохи:
а – Е + С; б – Е; в – W

Fig. 1. Average annual wind speeds (m/s) averaged over different circulation periods:
а – Е + С; б – Е; в – W

В работах А. А. Гирса отмечено, что аномальное развитие определенной формы циркуляции особенно четко проявляется в одном или двух сезонах [13]. Основываясь на этом заключении, нами были выделены метеорологические станции с максимальными значениями t -критериев Стьюдента для каждой пары циркуляционных эпох и проведены исследования внутригодовой изменчивости данного показателя (табл. 2).

Таблица 2. Эмпирические значения t -критериев Стьюдента для среднесезонных скоростей ветра

Table 2. Empirical values of Student's t -tests for seasonal average wind speeds

Метеостанция	Е + С / Е	Е + С / W	Е / W
Брест	Зима $t = 5,76$ Весна $t = 6,22$ Лето $t = 6,84$ Осень $t = 5,25$	Различия не значимы	Различия не значимы
Полоцк	Зима $t = 10,05$ Весна $t = 6,88$ Лето $t = 9,51$ Осень $t = 7,97$	Различия не значимы	Различия не значимы

Метеостанция	Е + С / Е	Е + С / W	Е / W
Минск	Зима $t = 7,10$ Весна $t = 5,80$ Лето $t = 8,17$ Осень $t = 6,85$	Различия не значимы	Различия не значимы
Василевичи	Различия не значимы	Зима $t = 8,25$ Весна $t = 11,50$ Лето $t = 13,18$ Осень $t = 14,49$	Зима $t = 4,04$ Весна $t = 5,70$ Лето $t = 5,35$ Осень $t = 5,73$
Витебск	Различия не значимы	Зима $t = 11,22$ Весна $t = 12,17$ Лето $t = 12,41$ Осень $t = 13,33$	Различия не значимы
Шарковщина	Различия не значимы	Зима $t = 9,41$ Весна $t = 8,13$ Лето $t = 10,17$ Осень $t = 15,58$	Различия не значимы
Пинск	Различия не значимы	Различия не значимы	Зима $t = 6,42$ Весна $t = 6,85$ Лето $t = 6,43$ Осень $t = 6,95$
Горки	Различия не значимы	Различия не значимы	Зима $t = 2,16$ Весна $t = 4,09$ Лето $t = 4,82$ Осень $t = 5,33$

Примечание. Серым фоном выделены статистически незначимые различия.

Скорость ветра на территории республики имеет четкий внутригодовой ход скоростей, который не претерпевает изменений в различные циркуляционные эпохи. В холодный период года (декабрь – март) наблюдаются наибольшие скорости ветра. В последующие месяцы скорость ветра постепенно снижается, достигая наименьших значений в июль и августе. В дальнейшем скорость ветра постепенно увеличивается. Такой ход скорости ветра связан с циклонической деятельностью, которая усиливается в осенне-зимний период, а в конце лета глубина и повторяемость циклонических образований уменьшаются [14].

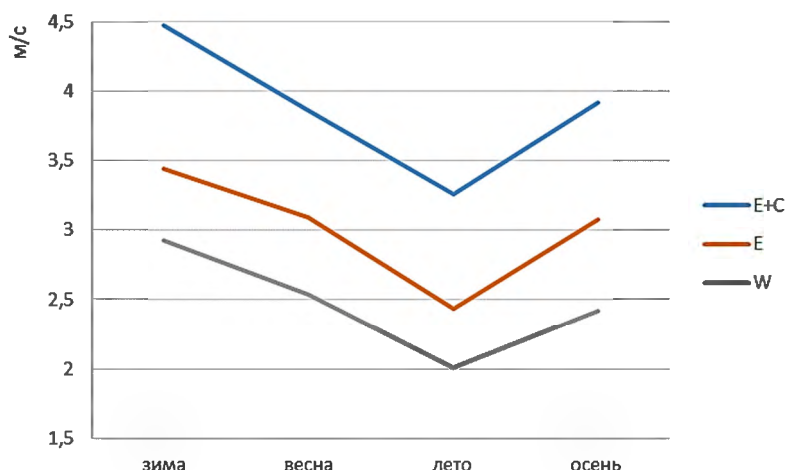


Рис. 2. Среднесезонные скорости ветра (м/с) циркуляционных эпох

Fig. 2. Seasonal average wind speeds (m/s) of circulation periods

Анализ эмпирических значений t -критериев Стьюдента для среднесезонных скоростей ветра показал, что максимальные статистически значимые различия между Е + С и Е циркуляционными эпохами приходятся, как правило, на летний период. Различия между эпохами Е + С и W наиболее ярко выражены в осенний период. Наибольшие различия среднесезонных скоростей ветра между Е и W циркуляционными эпохами отмечены в переходные сезоны (весна и осень), а наименьшие – зимой.

В результате анализа выборочных средних повторяемостей направлений ветра по восьми румбам между Е + С и Е циркуляционными эпохами статистически значимые различия при уровне значимости $\alpha = 5\%$ выделены для северного ветра в 17,65 % случаев, что является наименьшим показателем различия для данных эпох (табл. 3). Ветры с восточной составляющей имеют статистически значимые различия на уровне 43,00 %. Максимальные различия (70,59 %) наблюдаются для южного направления ветра, доля которого при восточной циркуляционной эпохе значительно увеличивается.

Таблица 3. Обобщенные данные статистически значимых различий в эмпирических значениях t -критериев Стьюдента и F -критериев Фишера для среднегодовых скоростей ветра, % от общего числа случаев

Table 3. Summary of statistically significant differences in empirical values of Student's t -tests and Fisher's F -tests for average annual wind speeds, % of the total number of cases

Форма циркуляции	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Е + С / Е	$t = 17,65$ $F = 17,65$	$t = 47,06$ $F = 5,88$	$t = 47,06$ $F = 0,00$	$t = 35,29$ $F = 35,29$	$t = 70,59$ $F = 41,18$	$t = 29,41$ $F = 17,65$	$t = 23,53$ $F = 5,88$	$t = 23,53$ $F = 5,88$
Е + С / W	$t = 35,29$ $F = 5,88$	$t = 47,06$ $F = 5,88$	$t = 47,06$ $F = 5,88$	$t = 76,47$ $F = 11,77$	$t = 82,35$ $F = 11,77$	$t = 41,18$ $F = 11,77$	$t = 52,94$ $F = 11,77$	$t = 52,94$ $F = 5,88$
Е / W	$t = 29,41$ $F = 0,00$	$t = 17,65$ $F = 11,77$	$t = 17,65$ $F = 11,77$	$t = 47,06$ $F = 23,53$	$t = 35,29$ $F = 11,77$	$t = 11,77$ $F = 23,53$	$t = 35,29$ $F = 0,00$	$t = 17,65$ $F = 17,65$

Различия в повторяемости направлений ветра более ярко выражены между Е + С и W эпохами. Наименьшие статистические различия характерны для северного направления, так же как и для Е + С и Е эпох, но количественный показатель возрастает до 35,29 %. Максимальные статистически значимые различия характерны для юго-восточного (76,47 %) и южного (82,35 %) направлений. Так, в циркуляционную Е + С эпоху возрастает доля юго-восточных ветров, а при W циркуляции значительно увеличивается повторяемость южных ветров. Такое распределение характерно для всей территории Беларуси за исключением Восточно-Белорусской физико-географической провинции, где при W циркуляции отмечается увеличение доли западных ветров, что может быть обусловлено крайним восточным положением регионе и, как следствие, ослаблением действия воздушных масс, поступающих с Атлантики.

Различия между изменчивостью направлений ветра между Е и W циркуляционными эпохами выражены слабее. Наиболее выражены изменения повторяемости юго-восточного направления ветра, доля которого увеличивается при Е циркуляции.

Статистически значимые различия характера колебания между циркуляционными эпохами выражены довольно слабо: 5,88–17,65 %. Наибольшие различия выявлены при смене эпохи Е + С на Е эпоху для юго-восточного (35,29 %) и южного (41,18 %) направлений (рис. 3).

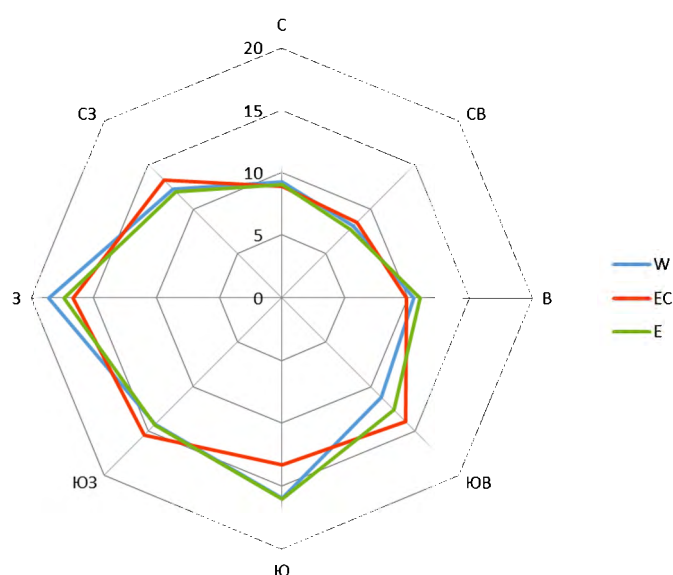


Рис. 3. Распределение повторяемости (%) направлений ветра за разные циркуляционные эпохи

Fig. 3. Distribution of frequency (%) of wind directions for different circulation periods

Для более детального изучения межсезонных различий между направлениями ветра в разные циркуляционные эпохи нами отобраны юго-восточное и южное направления ветров, так как они подвержены максимальной изменчивости при смене циркуляционных эпох. Для метеорологических станций, где были установлены статистически значимые различия в изменении среднегодовых повторяемостей данных направлений при смене циркуляционных эпох, нами проведен анализ выборочных средних повторяемостей направлений ветра по сезонам года (табл. 4).

Таблица 4. Эмпирические значения *t*-критериев Стьюдента для сезонных повторяемостей юго-восточного и южного направлений ветра

Table 4. Empirical values of Student's *t*-tests for seasonal frequencies of south-east and south wind directions

Метеостанция	ЮВ			Ю		
	Е + С / Е	Е + С / W	Е / W	Е + С / Е	Е + С / W	Е / W
Барановичи	Различия не значимы	з = 1,71 в = 0,87 л = 1,53 о = 1,29	з = 2,33 в = 0,75 л = 3,07 о = 1,59	Различия не значимы	з = 0,64 в = 3,47 л = 1,83 о = 4,49	з = 0,17 в = 0,77 л = 0,83 о = 2,00
Брест	Различия не значимы	з = 2,63 в = 1,40 л = 0,37 о = 1,57	Различия не значимы	з = 2,40 в = 2,22 л = 0,35 о = 1,92	з = 0,86 в = 2,37 л = 0,20 о = 2,51	Различия не значимы
Пинск	з = 2,06 в = 0,98 л = 0,87 о = 0,40	з = 3,47 в = 1,79 л = 2,16 о = 1,73	з = 1,98 в = 0,64 л = 1,32 о = 1,06	з = 1,65 в = 1,60 л = 1,49 о = 0,95	Различия не значимы	з = 2,34 в = 0,65 л = 1,58 о = 0,53
Брагин	Различия не значимы	з = 3,23 в = 3,19 л = 1,86 о = 1,56	з = 1,96 в = 1,61 л = 0,99 о = 1,38	Различия не значимы	з = 3,45 в = 2,71 л = 3,78 о = 3,63	з = 2,46 в = 1,76 л = 0,21 о = 1,10
Василевичи	Различия не значимы	Различия не значимы	Различия не значимы	з = 2,66 в = 1,91 л = 3,61 о = 3,07	з = 0,05 в = 1,59 л = 1,70 о = 1,38	Различия не значимы
Гомель	Различия не значимы	з = 2,89 в = 2,05 л = 0,19 о = 1,44	Различия не значимы	Различия не значимы	з = 2,23 в = 1,68 л = 2,06 о = 1,75	Различия не значимы
Гродно	Различия не значимы	з = 1,42 в = 1,87 л = 1,06 о = 1,33	Различия не значимы	з = 4,78 в = 8,05 л = 3,57 о = 4,20	з = 5,14 в = 6,90 л = 2,92 о = 4,28	Различия не значимы
Лида	Различия не значимы	з = 2,72 в = 1,11 л = 0,86 о = 2,55	з = 1,76 в = 0,45 л = 2,58 о = 0,32	з = 4,14 в = 4,75 л = 2,06 о = 4,59	з = 2,33 в = 2,58 л = 0,36 о = 3,28	з = 2,01 в = 2,35 л = 1,64 о = 1,60
Новогрудок	Различия не значимы	з = 2,48 в = 1,58 л = 1,40 о = 1,24	Различия не значимы	з = 1,94 в = 1,46 л = 3,59 о = 2,18	з = 0,38 в = 2,26 л = 1,57 о = 2,58	Различия не значимы
Марьина Горка	з = 1,76 в = 1,29 л = 0,75 о = 2,40	з = 2,24 в = 1,63 л = 1,64 о = 2,48	Различия не значимы	з = 2,10 в = 0,81 л = 0,58 о = 1,65	з = 1,05 в = 1,78 л = 0,73 о = 1,05	Различия не значимы
Минск	з = 2,39 в = 1,31 л = 0,61 о = 1,64	з = 3,52 в = 2,11 л = 2,16 о = 2,44	з = 1,34 в = 0,41 л = 1,66 о = 0,79	з = 1,88 в = 0,79 л = 0,25 о = 2,02	з = 2,02 в = 2,83 л = 0,05 о = 3,39	Различия не значимы
Горки	з = 0,23 в = 0,19 л = 2,27 о = 1,04	Различия не значимы	з = 2,01 в = 0,72 л = 0,53 о = 0,82	Различия не значимы	Различия не значимы	з = 0,69 в = 3,07 л = 1,38 о = 2,00

Метеостанция	ЮВ			Ю		
	Е+С/Е	Е+С/В	Е/В	Е+С/Е	Е+С/В	Е/В
Могилев	Различия не значимы	Различия не значимы	з = 2,08 в = 0,31 л = 0,77 о = 0,85	Различия не значимы	Различия не значимы	Различия не значимы
Верхнедвинск	Различия не значимы	з = 2,19 в = 0,25 л = 0,34 о = 1,02	з = 1,59 в = 0,14 л = 0,42 о = 0,86	з = 3,58 в = 0,19 л = 2,22 о = 2,64	з = 2,12 в = 2,22 л = 1,41 о = 3,29	Различия не значимы
Витебск	з = 2,71 в = 1,90 л = 2,33 о = 3,26	з = 6,40 в = 3,37 л = 4,87 о = 5,26	Различия не значимы	з = 2,16 в = 1,68 л = 2,34 о = 2,25	з = 1,04 в = 2,35 л = 0,98 о = 2,21	Различия не значимы
Полоцк	Различия не значимы	Различия не значимы	Различия не значимы	з = 1,89 в = 1,92 л = 3,03 о = 2,69	з = 2,12 в = 3,17 л = 2,40 о = 5,16	Различия не значимы
Шарковщина	з = 1,80 в = 1,76 л = 2,10 о = 2,41	з = 2,16 в = 1,33 л = 1,14 о = 2,60	Различия не значимы	з = 2,57 в = 2,51 л = 1,17 о = 2,00	з = 0,49 в = 2,72 л = 0,19 о = 2,25	з = 2,15 в = 0,21 л = 1,76 о = 0,11
Итого, %	з = 83,33 в = 33,33 л = 50,00 о = 50,00	з = 92,31 в = 46,15 л = 30,77 о = 38,46	з = 75,00 в = 0,00 л = 25,00 о = 0,00	з = 91,67 в = 50,00 л = 58,33 о = 83,33	з = 50,00 в = 85,71 л = 42,86 о = 85,71	з = 66,67 в = 33,33 л = 0,00 о = 33,33

Примечания.

1. з – зима; в – весна; л – лето; о – осень.
2. Полу жирным шрифтом выделены статистически значимые критерии.
3. Серым фоном выделены статистически незначимые различия.

В результате анализа выявлено, что при смене циркуляционных эпох наибольшие изменения в повторяемости юго-восточного направления ветра приходятся на зимний период (92,3–75,0 % случаев). Изменение повторяемости южного направления ветра имеет более сложную структуру. Так, при смене Е + С формы циркуляции на Е циркуляцию наибольшие изменения повторяемости южного ветра происходят в зимнее и осеннее время (91,7 и 83,3 % соответственно), при смене Е + С формы циркуляции на W циркуляцию максимальные изменения происходят весной и осенью (85,7 %). При смене Е формы циркуляции на W циркуляцию можно отметить изменения южного ветра зимой (66,7 %).

Выводы.

1. В результате анализа выборочных средних среднегодовых скоростей ветра статистически значимые различия в среднегодовой скорости ветра отмечены между всеми циркуляционными эпохами. Статистически значимые различия характера колебания между Е + С и Е, а также Е и W циркуляционными эпохами наблюдаются в 58,82 % случаев, а между Е + С и W эпохами выражены значительно слабее.

2. Анализ изменчивости среднесезонных скоростей ветра показал, что максимальные различия между Е + С и Е циркуляционными эпохами приходятся на летний период. Различия между Е + С и W эпохами наиболее ярко выражены в осенний период, а между Е и W – в переходные сезоны (весна и осень).

3. В результате анализа выборочных средних повторяемостей направлений ветра между Е + С и Е циркуляционными эпохами максимальные отличия отмечены для южного направления ветра. Более ярко выраженные различия в изменении направления ветра отмечены между Е + С и W эпохами, особенно для юго-восточных и южных ветров. Различия между изменчивостью направлений ветра между Е и W циркуляционными эпохами выражены слабо.

Список использованных источников

1. Логинов, В. Ф. Изменения климата: тренды, циклы, паузы / В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий. – Минск : Беларус. навука, 2017. – 179 с.
2. Логинов, В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата и их доказательная база / В. Ф. Логинов // Наука и инновации. – 2011. – № 4. – С. 5–9.

3. Боков, В. Н. Изменчивость атмосферной циркуляции и изменение климата / В. Н. Боков, В. Н. Воробьев // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2010. – № 13. – С. 83–88.
4. Прохорова, У. В. Исследование временной изменчивости характеристик атмосферной циркуляции в районе арх. Шпицберген / У. В. Прохорова, П. Н. Священников, Б. В. Иванов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2017. – № 4 (114). – С. 47–56. – URL: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-4-47-56> (дата обращения: 28.10.2024).
5. Климатология / О. А. Дроздов, В. А. Васильев, Н. В. Кобышева [и др.]. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 586 с.
6. Барашкова, Н. К. Классификация форм атмосферной циркуляции / Н. К. Барашкова, И. В. Кузевская, Д. В. Поляков. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2015. – 124 с.
7. Вангенгейм, Г. Я. Материалы для построения синоптических методов характеристики климата / Г. Я. Вангенгейм // Известия Главной геофизической обсерватории. – 1933. – № 2–3. – С. 3–16.
8. Гирс, А. А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов / А. А. Гирс. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 488 с.
9. Гирс, А. А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы / А. А. Гирс. – Л. : Гидрометеиздат, 1971. – 280 с.
10. Волчек, А. А. Колебания годового стока воды р. Припять – г. Мозырь / А. А. Волчек // ICEP – 2023. Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф. «Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды», посвящ. памяти доцента кафедры природообустройства, канд. географ. наук, доцента Шпока Ирины Николаевны, Брест, 16–17 окт. 2023 г. / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест : БрГТУ, 2023. – С. 14–29.
11. Кононова, Н. К. Типы глобальной циркуляции атмосферы: результаты мониторинга и ретроспективной оценки за 1988–2017 гг. / Н. К. Кононова // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. – Т. 3. – С. 108–123.
12. Логинов, В. Ф. Практика применения статистических методов при анализе и прогнозе природных процессов / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, П. В. Шведовский. – Брест : Изд-во БГТУ, 2004. – 301 с.
13. Гирс, А. А. Особенности внутригодовых преобразований макросиноптических процессов в различных циркуляционных эпохах / А. А. Гирс // Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института. – 1963. – Т. 283. – С. 33–56.
14. Волчек, А. А. Колебания скорости ветра на территории Беларуси на рубеже XX–XXI столетий / А. А. Волчек, А. В. Гречаник // 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. : в 2 ч. / 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. 1. – С. 201–204.

References

1. Loginov V. F. *Izmeneniya klimata: trendy, cikly, pauzy* [Climate change: trends, cycles, pauses]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, 179 p. (in Russian)
2. Loginov V. F. *Global'nye i regional'nye izmeneniya klimata i ih dokazatel'naya baza* [Global and regional climate changes and their evidence base]. *Nauka i innovacii = Science and Innovation*, 2011, no. 4, pp. 5–9. (in Russian)
3. Bokov V. N. Vorob'ev V. N. *Izmenchivost' atmosfernoj cirkulyacii i izmenenie klimata* [Atmospheric circulation variability and climate change]. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*, 2010, no. 13, pp. 83–88. (in Russian)
4. Prokhorova U. V., Svyaschennikov P. N., Ivanov B. V. *Issledovanie vremennoj izmenchivosti harakteristik atmosfernoj cirkulyacii v rajone arhiva Shpicbergen* [Study of temporal variability of atmospheric circulation characteristics in the region of the Spitsbergen archipelago]. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic*, 2017, no. 4 (114), pp. 47–56. Available at: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-4-47-56> (accessed 28 October 2024). (in Russian)
5. Drozdov O. A., Vasil'ev V. A., Kobysheva N. V., Raevskij A. N., Smekalova L. K., Shkol'nyj E. P. *Klimatologiya* [Climatology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, 586 p. (in Russian)
6. Barashkova N. K., Kuzhevskaya I. V., Polyakov D. V. *Klassifikaciya form atmosfernoj cirkulyacii* [Classification of atmospheric circulation forms]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2015, 124 p. (in Russian)
7. Vangengejm G. Ya. *Materialy dlya postroeniya sinopticheskikh metodov harakteristiki klimata* [Materials for the construction of synoptic methods for climate characterization]. *Izvestiya Glavnoj geofizicheskoy observatorii = News of the Main Geophysical Observatory*, 1933, no. 2–3, pp. 3–16. (in Russian)
8. Girs A. A. *Makrocirkulyacionnyj metod dolgosrochnyh meteorologicheskikh prognozov* [Macrocirculation method of long-term meteorological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 488 p. (in Russian)
9. Girs A. A. *Mnogoletnie kolebaniya atmosfernoj cirkulyacii i dolgosrochnye gidrometeorologicheskie prognozy* [Long-term variations in atmospheric circulation and long-term hydrometeorological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1971, 280 p. (in Russian)
10. Volchek A. A. *Kolebaniya godovogo stoka vody r. Pripyat' – g. Mozyr'* [Fluctuations in the annual water flow of the river Pripyat – Mozyr']. *ICEP – 2023. Aktual'nye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy sohraneniya sredy obitaniya: sbornik nauchnyh statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Vodohozyaj-stvennoe stroitel'stvo i ohrana okruzhayushchej sredy"* ["ICEP – 2023. Actual scientific, technical and environmental problems

- of habitat conservation". Proc. Int. sci. and pract. conf. "Water management construction and environmental protection". Brest, 2023, pp. 14–29. (in Russian)
11. Kononova N. K. *Tipy global'noj cirkulyacii atmosfery: rezul'taty monitoringa i retrospektivnoj ocenki za 1988–2017 gody* [Global atmospheric circulation types: results of monitoring and retrospective assessment for 1988–2017]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*, 2018, no. 3, pp. 108–123. (in Russian)
 12. Loginov V. F., Volchek A. A., Shvedovskij P. V. *Praktika primeneniya statisticheskikh metodov pri analize i prognoze prirodnykh processov* [Practice of applying statistical methods in the analysis and forecasting of natural processes]. Brest, BGTU Publ., 2004, 301 p. (in Russian)
 13. Girs A. A. *Osobennosti vnutrigodovykh preobrazovanij makrosinopticheskikh processov v razlichnykh cirkulyacionnykh epochah* [Features of intra annual transformations of macrosynoptic processes in different circulation epochs]. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta* [Proc. of the Arctic and Antarctic Research Institute], 1963, no. 283, pp. 33–56. (in Russian)
 14. Volchek A. A., Grechanik A. V. *Kolebaniya skorosti vetra na territorii Belarusi na rubezhe XX–XXI stoletij* [Wind speed variations in Belarus at the turn of the 20th–21st centuries]. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle: issledovanie transgranichnykh regionov. Sbornik materialov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. of the IV Int. Sci. and Pract. Conf. "Research of Transboundary Regions"]. Brest, 2019, part 1, pp. 201–204. (in Russian)

Информация об авторах

Волчек Александр Александрович – доктор географических наук, профессор, профессор кафедры природообустройства, Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: Volchak@tut.by

Гречаник Алёна Васильевна – магистр географических наук, исследователь, преподаватель кафедры городского и регионального развития, Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина (б-р Космонавтов, 21, 224016, г. Брест, Беларусь). E-mail: HrachanikA@tut.by

Information about the authors

Alexander A. Volchek – Dr. Sc. (Geography), Professor, Professor of the Department of Environmental Management, Brest State Technical University (Moskovskaya Str., 267, 224017, Brest, Belarus). E-mail: Volchak@tut.by

Aliona V. Hrachanik – Master of geographical sciences, Researcher, Lecturer of the Department of Urban and Regional Development, Brest State A. S. Pushkin University (Cosmonauts Boulevard, 21, 224016, Brest, Belarus). E-mail: HrachanikA@tut.by

ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА ЭКОСИСТЕМНЫХ ФУНКЦИЙ ГОРОДСКОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ Г. ГОМЕЛЯ)

Л. А. Кравчук, А. А. Яновский, Н. М. Баженова,
С. Г. Живнач, Н. К. Быкова, П. В. Книга

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. На примере крупного белорусского города Гомеля анализируются возможности использования данных спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для дифференцированной оценки структуры, состояния и эффективности функционирования озелененных территорий в городах. Предложен подход совмещенного использования данных ДЗЗ и дифференцированного геоинформационного проекта городских геотехнических систем (ГТС). Растительный покров выделов городской территории различного функционального назначения оценен по снимкам Sentinel-2 с расчетом нормализованного разностного индекса растительности (NDVI), индекса листовой поверхности (LAI), содержания в пологе хлорофилла (CCC) и степени озелененности (%). На основе подспутниковых исследований на тестовых полигонах структуры и состояния растительного покрова в основных типах городских экосистем Гомеля выполнена оценка связи индексов растительности с депонированием углерода городскими экосистемами. Данная оценка использована для создания дифференцированной картосхемы депонирования CO₂ растительностью в различных ГТС Гомеля.

Проведена дифференцированная оценка дневной температуры подстилающей поверхности (LST) ГТС Гомеля по снимкам Landsat и данным ГИС-проекта. В различных типах ГТС крупного города установлена значимая отрицательная связь между средними на момент съемки значениями LST и значениями LAI и степенью озелененности. Коэффициенты детерминации связей средних значений LST со средними значениями LAI и степенью озелененности всех выделов ГТС в городе оцениваются 0,41 и 0,48 соответственно.

Ключевые слова: растительный покров города; дистанционное зондирование; температура подстилающей поверхности; нормализованный разностный индекс растительности; индекс листовой поверхности; содержание в пологе хлорофилла.

Для цитирования. Кравчук Л. А., Яновский А. А., Баженова Н. М., Живнач С. Г., Быкова Н. К., Книга П. В. Дистанционная оценка экосистемных функций городской растительности (на примере г. Гомеля) // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 38–50.

REMOTE ASSESSMENT OF THE ECOSYSTEM FUNCTIONS OF URBAN VEGETATION (ON THE EXAMPLE OF GOMEL CITY)

L. A. Kravchuk, A. A. Yanovskiy, N. M. Bazhenova,
S. G. Zhivnach, N. K. Bykova, P. V. Kniga

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

Abstract. The possibilities of using satellite earth remote sensing (ERS) data for a differentiated assessment of the structure, condition and efficiency of green areas in cities are analyzed on the example of large Belarusian city Gomel. An approach is proposed for the combined use of ERS data and city GIS project differentiated by the types of urban geotechnical systems (GTS). The vegetation cover of the urban areas of various functional zones was assessed using Sentinel-2 images with the calculation of the normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI), canopy chlorophyll content (CCC) and the greening degree (%). An assessment of the relationship between vegetation indices and carbon deposition by urban ecosystems was made on the basis of the sub-satellite studies at test sites of the structure and state of vegetation in the main types of urban ecosystems of Gomel. The assessment was used to create a differentiated map of CO₂ deposition by vegetation in various GTS of Gomel.

A differentiated assessment of the daytime land surface temperature (LST) of Gomel GTS was carried out using Landsat images and GIS project data. The significant negative relationships have been found between the averaged for the time of survey LST values and the LAI and the greening degree values in various types of GTS of the large city. The

coefficients of the determination of the relationships of the average LST values with the average LAI values and the greening degree of all GTS sections in the city were equal to 0.41 and 0.48, respectively.

Keywords: urban vegetation cover; remote sensing; LST; NDVI; LAI; CCC; Gomel.

For citation. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M., Zhivnach S. G., Bykova N. K., Kniga P. V. Remote assessment of the ecosystem functions of urban vegetation (on the example of Gomel city). *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 38–50.

Введение. Проблемы оценки структуры, состояния и эффективности функционирования растительного покрова в городах актуализируются в связи с интенсивной застройкой городских территорий и продиктованы необходимостью оптимизации интегральной геотехсистемы города для создания благоприятной и устойчивой городской среды. Эти оценки востребованы при градостроительном планировании, диагностике состояния окружающей среды и оптимизации структуры озеленения, в том числе при проведении мероприятий по повышению экосистемных функций городских насаждений.

Концепция города как интегральной социо-геотехнической системы, состоящей из различных типов территориально распределенных геотехнических систем (далее – ГТС) – селитебных (жилых многоквартирных, жилых усадебных, общественных), производственных, коммунально-складских, транспортных, saniрующих, ландшафтно-рекреационных и сельскохозяйственных – делает возможной дифференцированную оценку структуры и особенностей функционирования растительного покрова в составе различных ГТС города.

В настоящее время для характеристики ландшафтов, растительного покрова, наряду с использованием сведений мониторинга, традиционных ландшафтных и геоботанических исследований, активно используются данные дистанционного зондирования земли (далее – ДЗЗ). Опыт их использования для получения качественных и количественных характеристик структуры ландшафтов [1], наземных экосистем [2, 3], в том числе для изучения особенностей растительного покрова на урбанизированных территориях [4–6 и др.], демонстрирует важность данного направления исследований для познания динамики и тенденций изменения природных и природно-антропогенных комплексов в составе городов, в том числе для оценки эффективности выполнения ими экосистемных функций.

Цель работы – изучить возможность сопряженного использования данных ДЗЗ и ГИС-проекта ГТС урбанизированной территории для дифференцированной оценки структуры и состояния растительного покрова, а также оценки эффективности выполнения им основных экосистемных функций.

Методика и материалы исследований. Для оценки структуры и состояния растительного покрова в различных ГТС города Гомеля использована сопряженная обработка данных ДЗЗ и дифференцированного в разрезе ГТС геоинформационного проекта (ГИС-проекта) городской территории.

Для территории Гомеля подготовлен ГИС-проект, в котором с использованием данных публичной кадастровой карты (<https://map.nca.by>), Геопортала ЗИС УП Белгипрозем (<https://gismap.by>), картографической подосновы идентифицированы и оконтуры ГТС производственной (П) и коммунально-складской (КС), жилой многоквартирной (ЖМ) и жилой усадебной (ЖУ), общественной различных типов (О) и специальной (СП) застройки, а также сельскохозяйственные (СХ) и ландшафтно-рекреационные (ЛР) территории. В последних выделены виды – леса и лесопарки (ЛП), парки, малые ландшафтные формы (МЛФ), к которым отнесены скверы, бульвары, а также растительность на незастроенных участках – резервных озелененных территориях (РОТ). Она представлена участками, планируемыми в перспективе для рекреационного благоустройства (РОТ_{персп}), согласно схеме озелененных территорий городских районов Гомеля [7], а также защитными насаждениями в санитарно-защитных зонах предприятий и коммунальных объектов (РОТ_з). В целом на территории Гомеля в ГИС-проекте выделено около 2,7 тыс. выделов, среди которых идентифицировано 11 типов и 33 вида ГТС.

Для получения актуальных данных о структуре и состоянии растительного покрова на территории Гомеля исследования проведены в период максимального его развития – в июле 2024 г. Этапы исследований включали:

- подбор имеющихся в свободном доступе снимков ДЗЗ, наиболее близких по времени съемки с проведением натурных подспутниковых исследований;
- проведение исследований на тестовых полигонах для оценки структуры и состояния растительного покрова в составе различных ГТС;
- обработку снимков с расчетом индексов, характеризующих растительный покров (NDVI, LAI, CCC), а также температуру подстилающей поверхности (LST);
- корегистрацию снимков и ГИС-проекта;
- анализ данных ДЗЗ в разрезе структурно-планировочных выделов городских ГТС, их типов и видов;

– расчеты основных экосистемных функций по дифференцированным данным ДЗЗ и установленным для Гомеля при подспутниковых исследованиях связях с использованием полученных регрессионных уравнений;

– построение дифференцированных картосхем для оценки показателей, характеризующих основные экосистемные функции растительного покрова в разрезе ГТС.

Расчет значений нормализованного разностного индекса растительности (англ. normalized difference vegetation index – NDVI) [8], индекса листовой поверхности (англ. leaf area index – LAI, м²/м²) и содержания в растительном пологе хлорофилла (англ. canopy chlorophyll content – CCC, мкг/см²) выполнен по снимкам спутника серии Sentinel-2.

В работе использованы снимки спутников S2A и S2B уровня обработки 1C (ортопроектированные снимки, представленные значениями коэффициента отражения на уровне апертуры радиометра с субпиксельной точностью совмещения спектральных каналов) с датой съемки для Гомеля 13 июля 2024 г. Атмосферная коррекция выполнена с помощью программы обработки Sen2Cor [9], которая основана на алгоритме «Атмосферная/топографическая коррекция спутниковых снимков» (ATCOR) [10] и использует модель переноса излучения LIBRADTRAN [11]. Для повышения точности классификации Sen2Cor водных объектов, городской застройки, открытой поверхности Земли применен дополнительный пакет данных ESACCI-LC для Sen2Cor [12].

При расчете NDVI, LAI, CCC использованы каналы с пространственным разрешением 10 и 20 м; последние привели к разрешению 10 м, согласно [13]. Расчет NDVI выполнен с пространственным разрешением 10 м. При расчете LAI и CCC использованы преимущественно каналы с разрешением 20 м. Из дальнейших расчетов исключены пиксели с искаженными или вышедшими на насыщение значениями, а также облака и их тени.

Для коррекции субпиксельного смещения геопривязки снимков выполнена их корегистрация на снимки сверхвысокого пространственного разрешения. Для идентификации растительности по снимкам Sentinel-2 рассчитан нормализованный разностный индекс растительности

$$NDVI = (b_7 - b_4) / (b_7 + b_4), \quad (1)$$

где b_4 и b_7 — значения спектральных каналов 4 и 7 соответственно мультиспектрального прибора MSI спутников серии Sentinel-2.

Показатели LAI и CCC рассчитаны с помощью модуля «биофизический обработчик» L2B программы Sentinel-2 Toolbox [14]. Расчет LAI и CCC биофизическим обработчиком проведен на основе нейронных сетей. Обучающая выборка получена авторами модуля с помощью модели переноса излучения [15]. В частности, выполнено моделирование отражательной способности полога для большинства типов и состояния растительности при условии регистрации излучения в спектральных диапазонах каналов Sentinel-2 при возможных значениях геометрии съемки [15].

Температура подстилающей поверхности (англ. land surface temperature – LST) определена по снимкам спутников серии Landsat, которые в настоящее время представлены спектрорадиометрами среднего пространственного разрешения на спутниках Landsat 7 (прибор ETM+, 1 канал в тепловом диапазоне с пространственным разрешением 60 м) и Landsat 8 и 9 (прибор TIRS, 2 канала в тепловом диапазоне с пространственным разрешением 100 м). Для анализа LST Гомеля отобраны снимки, сделанные в безоблачные дни, ближайшие по времени съемки к отобранным ранее для оценки индексов растительности снимкам Sentinel-2. Выбранный снимок LST для Гомеля получен спутником Landsat 8 (дата и время съемки: 10.07.2024 г., 11 ч 54 мин местного времени). Тепловые каналы спутников серии Landsat (яркостная температура) приведены оператором Landsat к разрешению 30 м путем передискретизации методом «кубическая свертка», вследствие чего рассчитанная на их основе кинетическая температура поверхности характеризуется еще меньшим, чем исходное, эффективным пространственным разрешением. Для оценки показателей LST в разрезе основных типов и видов ГТС в городах выполнена коррекция геопривязки снимков Landsat и извлечены значения кинетической температуры поверхности пикселей, соответствующих выделам ГТС в ГИС-проекте Гомеля.

Для последующего анализа данных ДЗЗ выполнена корегистрация данных ДЗЗ и ГИС-проекта Гомеля, дифференцированного в разрезе выделов ГТС (рис. 1).

Степень озелененности в каждом выделе ГТС рассчитана как отношение пикселей, идентифицированных по значениям NDVI как растительность, к общему числу зарегистрированных пикселей.

Результаты и их обсуждение. Анализ ГИС-проекта Гомеля в разрезе выделов ГТС (см. рис. 1) показал, что на городской территории преобладают ГТС застроенных территорий, доля которых оценивается приблизительно в 51 %. Из них около 18 % составляют ГТС жилой усадебной застройки, что вдвое выше площади ГТС жилой многоквартирной застройки (9 %). Доля участков под промышленными и коммунально-складскими ГТС близка к 16 %, а под общественными и специализированными ГТС составляет 6 и 1 % соответственно. Дорожно-транспортные ГТС (с учетом инфраструктуры – стоянок, развязок, автозаправочных станций и др.) занимают около 9 % территории Гомеля, из них собственно дороги и транспортные коммуникации составляют приблизительно 5 % (без учета проездов в составе

застройки). Доля saniрующих и нарушенных ГТС (участков незавершенного строительства) на момент исследования составляет около 1 %.

В составе Гомеля доля водных объектов оценивается в 6 %. Они представлены как участками р. Сож и ее затоками, фрагментом р. Ипуть, входящем в городскую черту, так и карьерными водоемами, расположенными на городской территории и рекультивированными для целей рекреации.

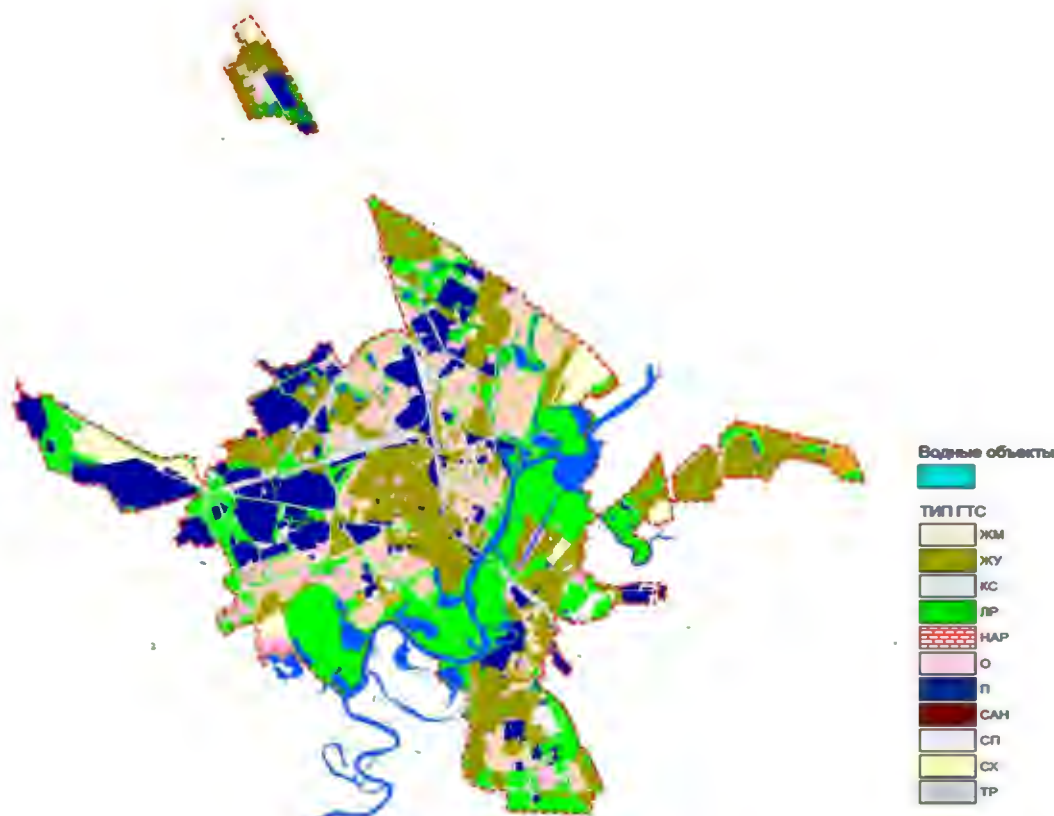


Рис. 1. Структура типов ГТС г. Гомеля:

ЖМ – жилые многоквартирные; ЖУ – жилые усадебные; КС – коммунально-складские;
ЛР – ландшафтно-рекреационные; НАР – нарушенные (в том числе незавершенное строительство);
О – общественные; П – производственные; САН – saniрующие; СП – специальные;
СХ – сельскохозяйственные; ТР – транспортные

Fig. 1. Structure of the Gomel GTS types:

ЖМ – residential multi-apartment; ЖУ – residential estate; КС – communal warehouse;
ЛР – landscape-recreation; НАР – disturbed areas (including under construction); О – public;
П – industrial; САН – sanitizing; СП – special; СХ – agricultural; ТР – transportation

Ландшафтно-рекреационные территории без учета водных объектов (леса, лесопарки, парки, малые архитектурные формы, резервные благоустроенные территории) занимают приблизительно 26 % городской территории. В составе ЛР Гомеля высока доля природных комплексов, которые представлены лесами, лесопарками, а также резервными озелененными территориями (РОТ и РОТ_{персп}) с древесно-кустарниковой растительностью, луговыми и болотными экосистемами, приуроченными в своем большинстве к доливному комплексу р. Сож и водоемам. На них же созданы зоны кратковременного отдыха у воды с пляжами.

Учитывая высокое участие промышленных ГТС и транспортной инфраструктуры, в Гомеле высока доля защитных насаждений (РОТ_з), расположенных в санитарно-защитной зоне предприятий, в санитарных разрывах между промзонами и коммуникациями, вдоль магистралей (около 5 %).

Участие благоустроенных рекреационных объектов общего пользования – парков, скверов, бульваров, озелененных территорий общественных центров – в составе городской территории составляет около 2 %.

Полученные данные ДЗЗ представлены в виде средних значений NDVI, LAI и CCC в разрезе выделов городских ГТС различного функционального назначения (см. рис. 2–5).

Распределение средних значений NDVI в структурно-планировочных выделах различных ГТС городской территории Гомеля, которые содержат растительный покров, приведены на рис. 2. Как видно из картосхемы, наиболее высокие средние значения NDVI (0,6–0,7) регистрируются в долине

р. Сож, поросшей древесно-кустарниковой растительностью, представленной ивами, тополями, осинной, местами – дубом, кленом и ольхой, нередко заболоченной, а также в лесах на южной окраине города и лесопарке левобережья. Сравнительно высокие средние значения NDVI (0,5–0,6) регистрируются также в жилой усадебной застройке в центре и на северной окраине города.

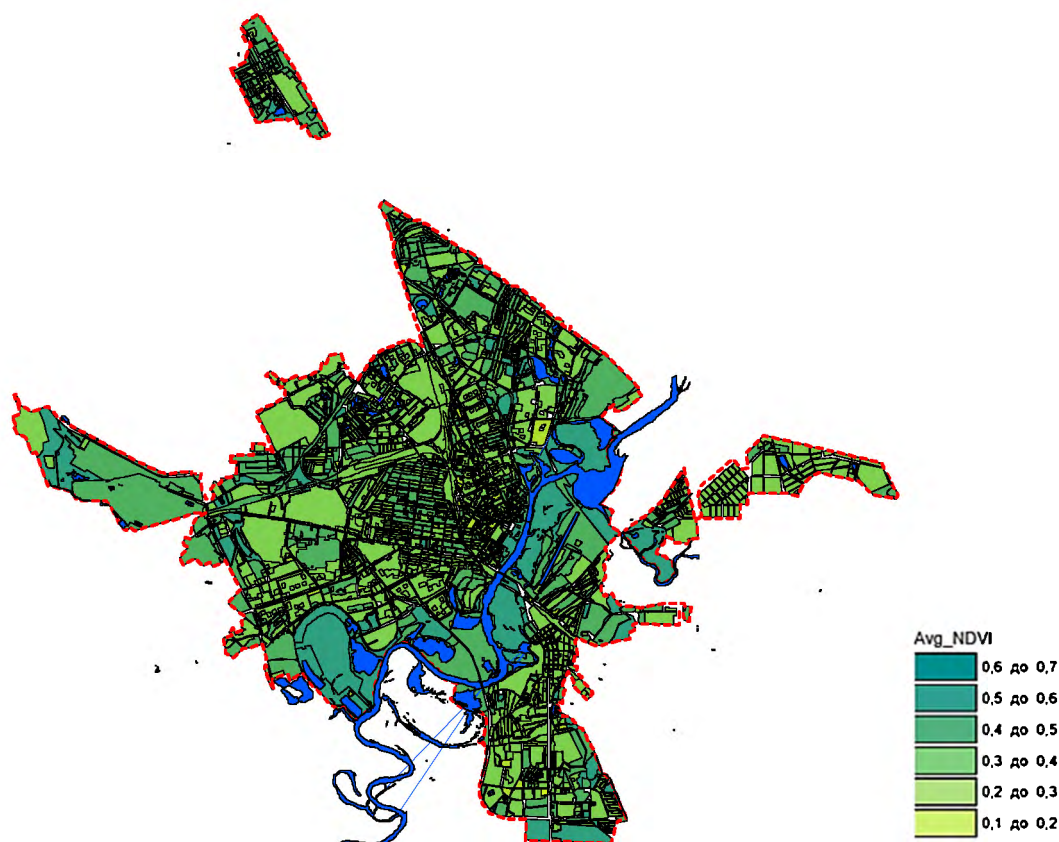


Рис. 2. Схема распределения средних значений NDVI (Avg_NDVI) в выделах ГТС г. Гомеля

Fig. 2. Scheme of average normalized difference vegetation index (NDVI) values of geotechnical systems (GTS) units in Gomel

Значимым социально-экологическим показателем уровня организации озелененных территорий в городах является степень озелененности городской застройки, которая регламентируется в Беларуси экологическими и строительными нормами [16, 17]. Данный показатель оценен путем расчета отношения числа пикселей со значениями NDVI, соответствующих растительности, к общему числу пикселей, попавших в анализируемый выдел. Дифференцированная оценка степени озелененности городской территории позволила выявить участки с низкой озелененностью (рис. 3).

Картосхема на рис. 3 наглядно демонстрирует пониженные показатели степени озелененности на участках ряда производственных ГТС на севере города, в некоторых кварталах новой жилой многоквартирной, усадебной и общественной застройки в микрорайонах Кленки (в границах ул. Свиридова, Макаенка, Олимпийской), Шведская Горка, Южный, Хутор, Мельников Луг, в новой жилой усадебной застройке Романовичи, а также ряда общественных территорий (преимущественно ГТС торгово-бытовой застройки).

Для оценки ряда экосистемных функций (потенциал пылезадержания и ассимиляции загрязняющих веществ, интенсивность транспирации, перераспределение атмосферных осадков, депонирование углерода и др.) важной характеристикой растительности является индекс листовой поверхности – LAI. Он характеризует степень развития ассимиляционных органов растений и определяется суммарной площадью односторонней поверхности листьев или хвои на единицу поверхности почвы. Выражается либо безразмерной величиной, либо в мерах площади ($\text{м}^2/\text{м}^2$, га/га). Коррелирует с фотосинтезирующей биомассой, чистой продукцией (приростом), депонированием углерода и др. Зависит от типа растительности, степени ее угнетения, условий произрастания. Согласно [18, с. 175] он «...признан одним из важнейших показателей в лесоведении, экофизиологии растений, метеорологии, при ДЗЗ,

а также служит ключевой переменной для региональных и глобальных моделей обмена энергии, углекислоты, влаги и других соединений биосферы и атмосферы». Следует отметить, что значения LAI существенно варьируют в связи с сезонным ростом и дефолиацией, а также угнетением растений. На сельскохозяйственных землях и лугах LAI определяется видом сельскохозяйственной культуры, стадией ее развития и агротехническими мероприятиями. Уборка сельскохозяйственных культур, косьба лугов, газонов, обрезка деревьев, деградация газонов приводят к снижению LAI. При оценках LAI с использованием ДЗЗ можно определить эффективный LAI.

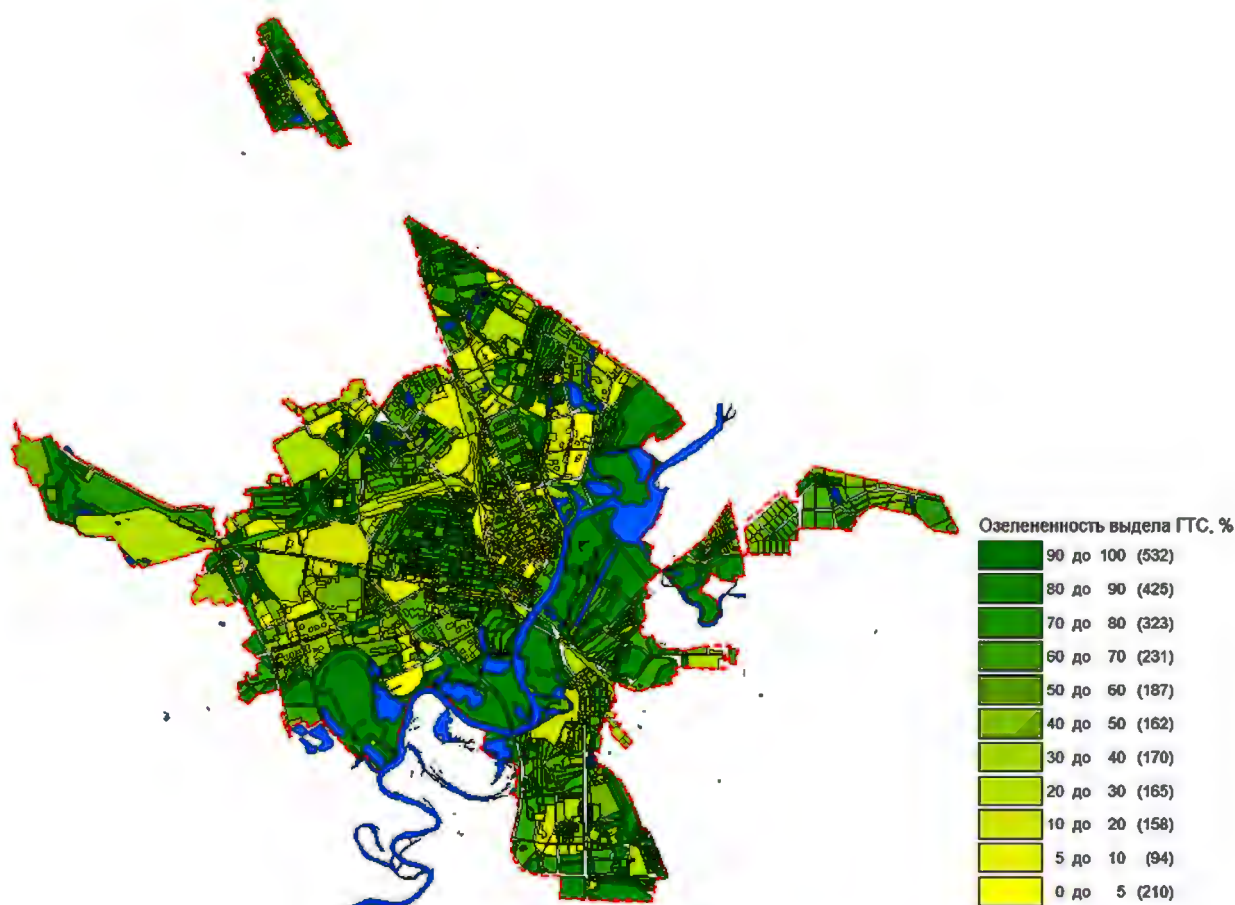


Рис. 3. Схема степени озелененности (%) выделов ГТС на территории г. Гомеля

Fig. 3. Scheme of greenery degree (%) of geotechnical systems (GTS) units in Gomel

Распределение средних значений LAI растительного покрова в ГТС Гомеля, полученных по данным ДЗЗ, приведено на картосхеме рис. 4. Низкие значения LAI в выделе свидетельствуют о незначительном участии древесно-кустарниковой растительности, разреженном травянистом покрове в нем. Низкие средние значения LAI в Гомеле регистрируются преимущественно для участков новостроек в составе ГТС жилой многоквартирной застройки в микрорайоне Кленки (в границах ул. Свиридова, Макаенка, Олимпийской), Шведская Горка, Южный, Хутор, Мельников Луг (в границах ул. Бородина, Мазурова, бульвара Газеты Гомельская Правда), новой жилой усадебной застройки в Романовичах, ряда общественных территорий (преимущественно ГТС торгово-бытовой застройки).

Визуально весьма близким к LAI является распределение для выделов Гомеля содержания хлорофилла в пологе (ССС), которое зависит как от плотности, так и от степени дефолиации древесно-кустарниковой растительности, деградации травянистого яруса на городских территориях, угнетения растительности. Средние значения NDVI, LAI и СССР (деленное на 100 для отражения на единой диаграмме) в разрезе типов ГТС Гомеля приведены на рис. 5.

На основе зависимостей, выявленных на тестовых полигонах (ТП) подспутниковых исследований, возможно оценить депонирование углерода растительностью в составе городских ГТС Гомеля.

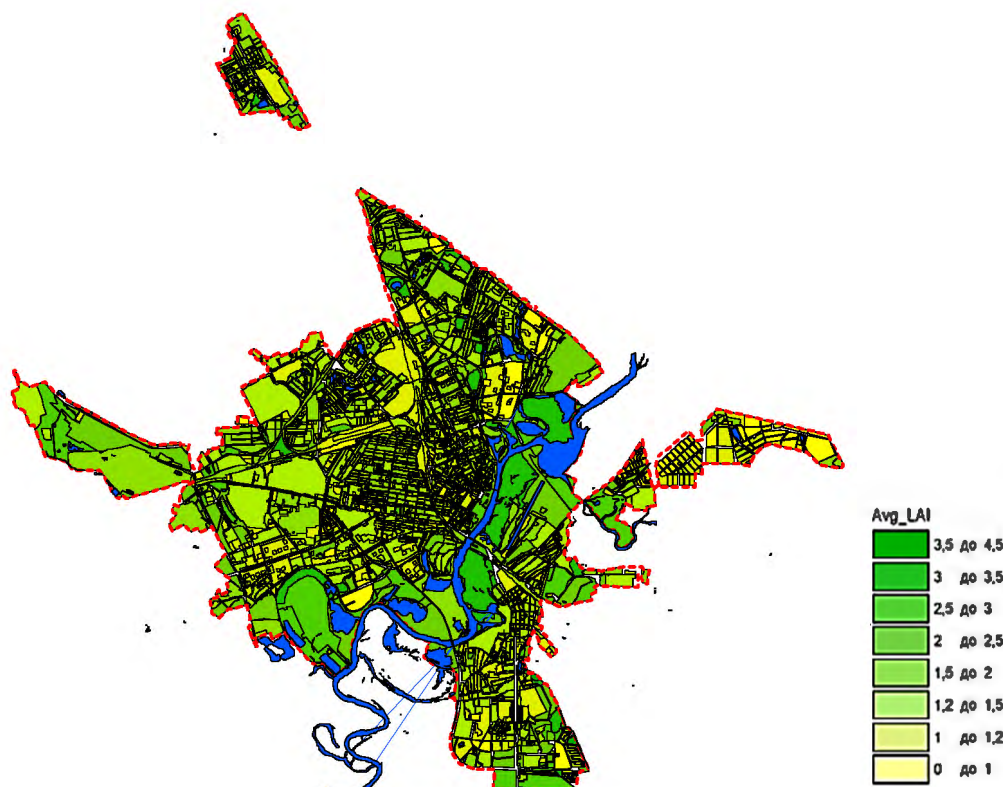


Рис. 4. Схема распределения средних значений индекса листовой поверхности (Avg_LAI) в выделах ГТС на территории г. Гомеля

Fig. 4. Scheme of average leaf area index (LAI) values in geotechnical systems (GTS) units in Gomel

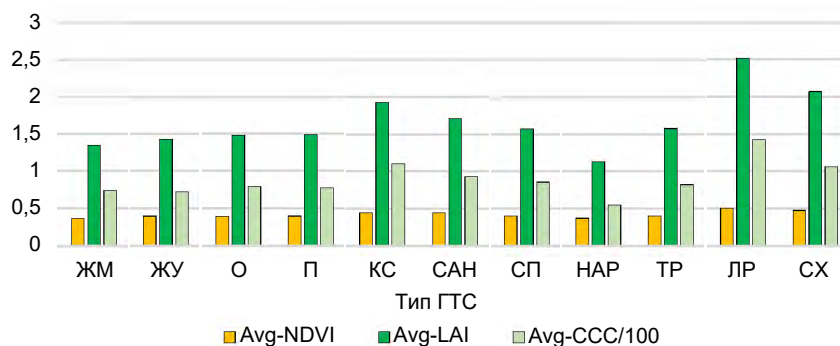


Рис. 5. Средние значения нормализованного вегетативного индекса (Avg-NDVI), индекса листовой поверхности (Avg-LAI) и содержания хлорофилла в пологе (Avg-CCC/100) для основных типов ГТС г. Гомеля. Обозначения те же, что и на рис. 1

Fig. 5. Average normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI) and canopy chlorophyll content (CCC) values of main GTS types in Gomel. The designations are the same as in the fig. 1

Исследования на ТП проводились в период, наиболее приближенный к времени спутниковой съемки (22–25.07.2024) и подразделялись на два типа – точечные и площадные. В качестве ТП точечного типа выбирали наименее фрагментированные участки растительного покрова (леса, парки, скверы, древесно-кустарниковую растительность в составе резервных озелененных территорий, насаждения в ГТС жилой многоквартирной и общественной застройки). Площадные полигоны выделяли в ГТС с высокой фрагментацией насаждений техногенными зданиями, сооружениями и покрытиями. В последних с использованием геопортала ЗИС (GISmap.by) оценивали степень озелененности отдельных выделов основных типов ГТС-анализа и картографирования, на основании которых рассчитывали ошибку дистанционных оценок. Оценка состояния растительного покрова на точечных ТП включала выявление структуры и состояния древесно-кустарникового яруса, его морфометрические обмеры, а также изучение проективного покрытия травянистого яруса с определением высоты и видового состава травостоя. По таблицам и моделям хода роста и биологической продуктивности с использованием работ [19, 20]

определяли продуктивность и удельные показатели депонирования углерода растительностью на тестовых полигонах. Исследовали связь NDVI, LAI и CCC с депонированием углерода. Для 27 точечных ТП в Гомеле наиболее плотные связи депонирования углерода получены для LAI. Регрессионные уравнения связи депонирования углерода для Гомеля с LAI отражены на рис. 6.

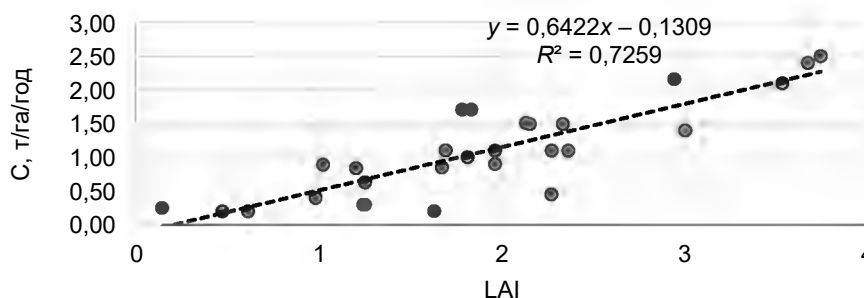


Рис. 6. Связь расчетных показателей депонирования углерода (C, т/га/год) с показателями LAI на тестовых полигонах г. Гомеля

Fig. 6. Relationships between calculated carbon sequestration indicators (C, tons/hectare/year) and leaf area index (LAI) values at test sites in Gomel

Использование регрессионных уравнений линейной зависимости связи расчетных показателей депонирования углерода (C, т/га /год) со средними показателями LAI на тестовых полигонах Гомеля (см. рис. 6) позволило провести оценку удельных показателей депонирования углерода растительностью в разрезе ГТС различных типов, используя значения средних показателей LAI в данных ГТС Гомеля (см. рис. 3). Полученные результаты приведены на рис. 7 в пересчете на CO₂.

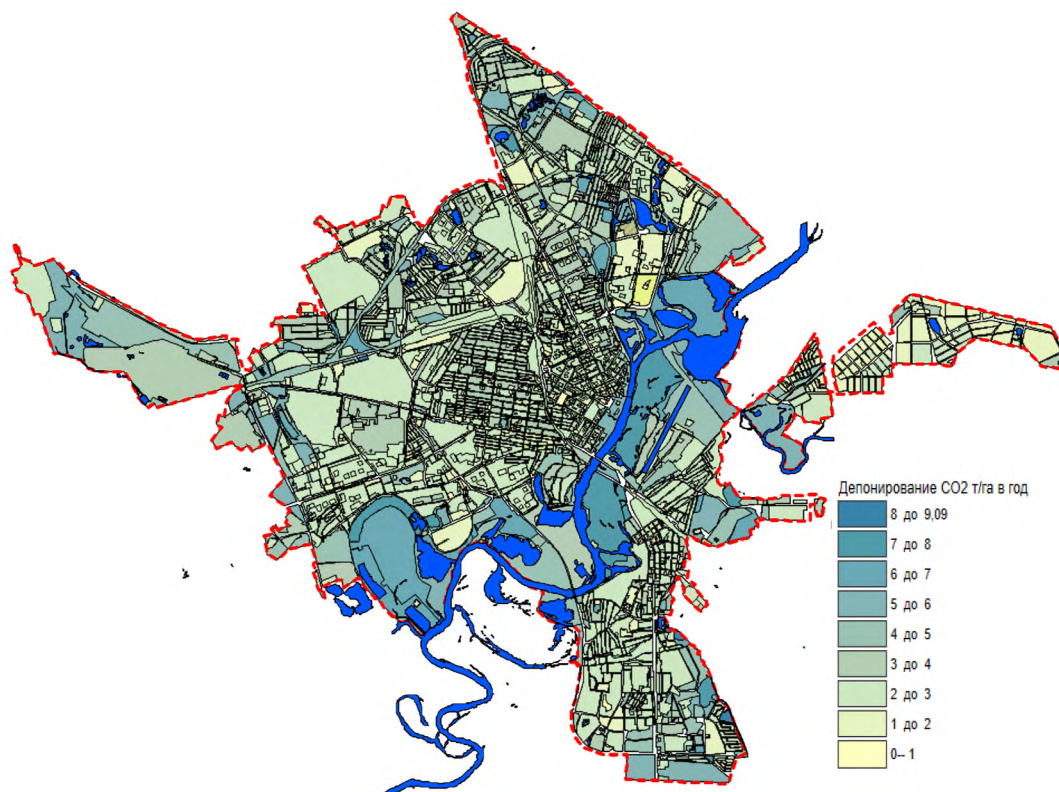


Рис. 7. Схема удельного депонирования углекислого газа растительным покровом в выделах ГТС на территории г. Гомеля, т/га в год

Fig. 7. Scheme of CO₂ sequestration by vegetation cover at geotechnical systems (GTS) units in Gomel, tons per hectare per year

В целом, как показали оценки на момент исследований, растительностью в составе основных ГТС Гомеля ежегодно депонируется приблизительно 31 тыс. т углекислого газа. При этом на территории города наибольшее количество – около 17,4 тыс. т – депонируется насаждениями ландшафтно-рекреационных территорий, к которым относятся леса и лесопарки, парки, скверы, бульвары, защитные насаждения вблизи промышленных предприятий, незастроенные резервные озелененные территории в долинах рек Сож и Ипуть. Насаждения в составе ГТС жилой усадебной застройки Гомеля ассимилируют около 5,8 тыс. т CO_2 , в ГТС жилой многоквартирной и общественной застройки – 1,5 и 1,3 тыс. т соответственно, производственной и коммунально-складской – близко к 1,8 тыс. т, дорожно-транспортной инфраструктуры и спецтерриторий 0,6 и 0,2 тыс. т соответственно.

Одной из важнейших для городов экосистемных функций насаждений является регулирование микроклиматических условий. Информация о локализации городских островов тепла необходима для принятия оптимизационных мер.

Оценка распределения средних значений LST на городской территории Гомеля в разрезе выделов ГТС позволила определить наиболее охлажденные и нагретые участки на территории Гомеля (рис. 8). Средние, максимальные и минимальные значения LST во всех выделах ГТС различного типа приведены на рис. 9 соответственно. Следует отметить, что для улиц и автодорог оценку LST не проводили, поскольку характерная ширина их меньше пространственного разрешения снимков, что существенно снижает точность оценок, LST оценивали для транспортной инфраструктуры (развязки, придорожные полосы, отводы железной дороги, заправки и др.).

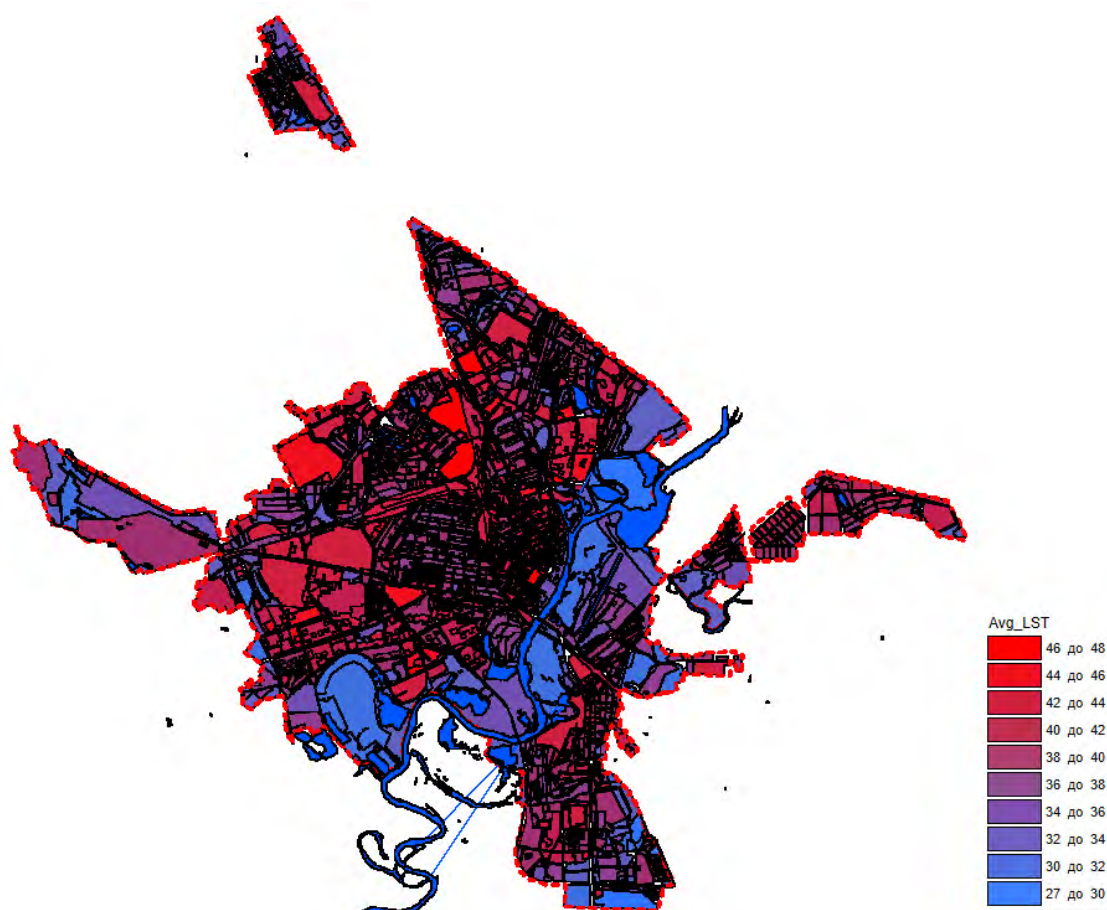


Рис. 8. Схема средних значений температуры подстилающей поверхности (Avg_LST, °C) в выделах ГТС на территории г. Гомеля

Fig. 8. Scheme of average land surface temperature (LST) values (Avg_LST, °C) at geotechnical systems (GTS) units in Gomel

Как видно из рис. 8, наиболее охлажденными на территории Гомеля на момент съемки являются незастроенные участки поймы р. Сож, заболоченные и покрытые древесно-кустарниковой и луговой растительностью, а также участки городских лесов на юге города и лесопарка левобережья. На застроенных территориях сравнительно низкие значения LST отмечаются в жилой усадебной застройке

в центре города и на его северной окраине. Высокие средние и максимальные значения LST регистрируются в пределах промышленных ГТС на севере («Гомсельмаш», ОАО «Салео-Гомель») и северо-западе города (ОАО «Гомельский завод литья и нормалей»), что возможно объяснить, как наличием «горячих» производственных циклов, так и низкой степенью озелененности этих промышленных территорий. Сравнительно повышенные средние значения LST регистрируются также в кварталах новой жилой многоквартирной (Шведская горка, Мельников луг) и усадебной (Романовичи) застройки, что возможно связать с низкими показателями озелененности этих участков и невысокой долей древесных растений в новой застройке. Наименьшие средние значения LST регистрируются в лесных массивах на южной окраине Гомеля, а также на территории природного парка Дубовая роща и лесопарке левобережья.

Особенности изменения LST в различных типах ГТС приведены на рис. 9.

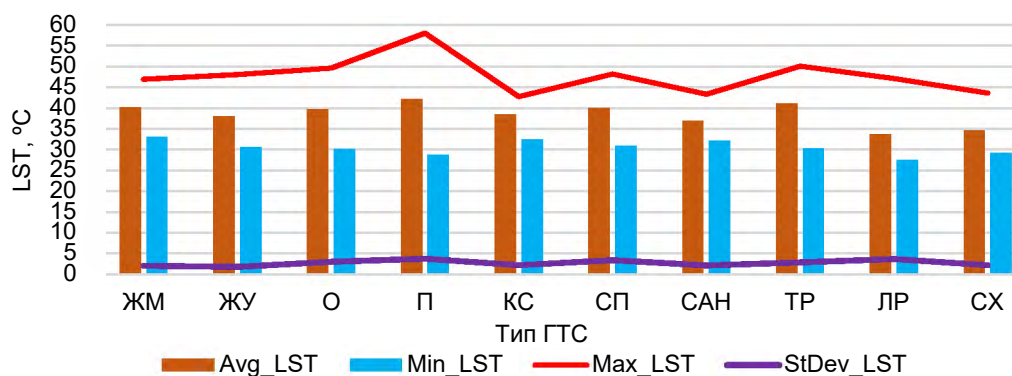


Рис. 9. Показатели в основных типах ГТС на территории г. Гомеля. Обозначения те же, что и на рис. 1

Fig. 9. land surface temperature (LST) values of main geotechnical systems (GTS) types in Gomel. The designations are the same as in the fig. 1

Оценка связи между средней температурой подстилающей поверхности (LST_{avg}) и показателями растительности позволила установить наиболее значимые отрицательные связи LST со степенью озелененности (%) выделов ГТС в Гомеле (рис. 10). Зависимости LST_{avg} от средних в выделах значений NDVI, LAI и CCC являются менее значимыми.

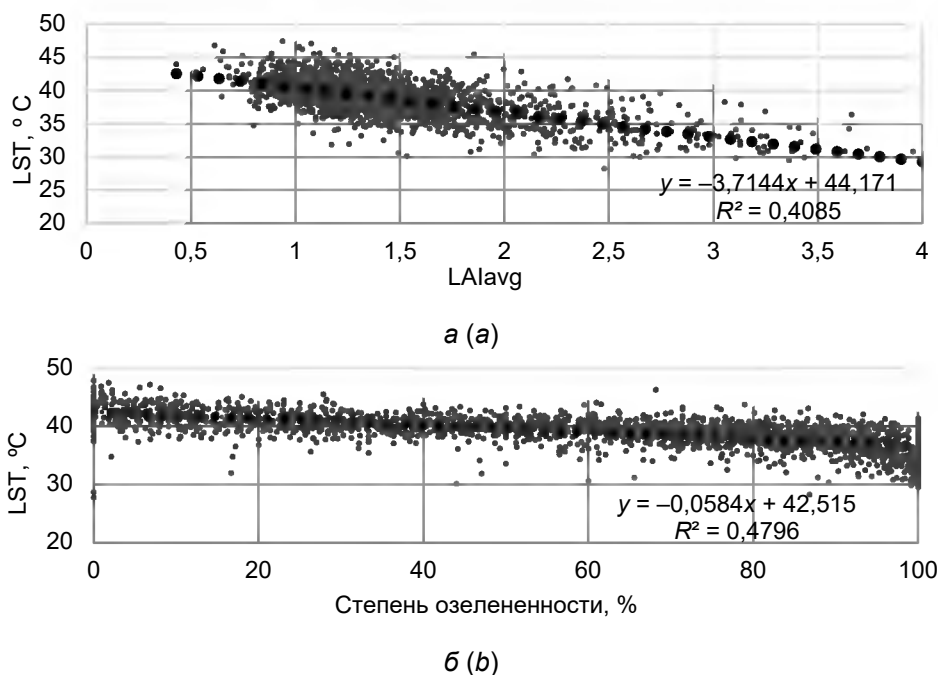


Рис. 10. Связь средней температуры подстилающей поверхности (LST_{avg}): а – со средними значениями индекса листовой поверхности (LAI_{avg}); б – со степенью озелененности (%) в выделах ГТС в г. Гомеле

Fig. 10. Relationships between average of the land surface temperature (LST): а – average of the leaf area index (LAI) values; б – greenery degree (%) of geotechnical systems (GTS) units in Gomel

Заключение. Использованный методический подход к дифференцированной оценке экосистемных функций озелененных территорий в различных ГТС Гомеля предполагает последовательное выполнение процедуры сопряженного анализа данных ДЗЗ и ГИС-проекта города, дифференцированного в разрезе основных типов и видов ГТС. Созданный дифференцированный ГИС-проект структуры ГТС Гомеля позволил идентифицировать местоположение, установить уникальный идентификационный номер, провести кодировку ГТС по типам и видам, определить площадь, степень участия различных типов ГТС в составе городских территорий. Выявлено, что доля ГТС застроенных территорий составляет около 51 % от площади территории Гомеля. ГТС усадебной застройки в Гомеле занимают 18 %, жилой многоквартирной практически вдвое ниже, а производственно-коммунальной 16 %. Выявлено участие озелененных территорий в составе незастроенной части Гомеля (26 %), среди них высоко участие природных комплексов, расположенных в долине р. Сож.

С использованием сопряженного анализа данных ДЗЗ и ГИС-проекта ГТС Гомеля проведена дифференцированная оценка основных индексов, характеризующих растительный покров (NDVI, LAI, CCC), а также температуры подстилающей поверхности. Для территории города в ГИС-проекте ГТС построены дифференцированные картосхемы распределения средних значений NDVI, LAI, LST, а также степени озелененности для 2,7 тыс. выделов. Они позволили выявить участки с низкими показателями озелененности, слабым развитием растительного покрова. Полученные оценки температуры подстилающей поверхности (LST) в полдень летнего периода (июль 2024 г.) в Гомеле выявили на территории города участки с высокими средними и максимальными показателями LST – территории промзон крупных градообразующих предприятий, новой жилой многоквартирной и усадебной застройки, нарушенные территории (участки незавершенного строительства).

С использованием зависимостей, полученных на точечных полигонах при подспутниковых наземных исследованиях растительного покрова в Гомеле, было оценено депонирование углекислого газа городскими экосистемами и рассчитано, что растительностью в составе основных ГТС Гомеля ежегодно депонируется приблизительно 31 тыс. т углекислого газа. Наибольшее количество – около 17,4 тыс. т – депонируется насаждениями ландшафтно-рекреационных территорий, к которым относятся леса и лесопарки, парки, скверы, бульвары, защитные насаждения вблизи промышленных предприятий, незастроенные резервные озелененные территории в долине р. Сож. Насаждения в составе ГТС жилой усадебной застройки Гомеля ассимилируют около 5,8 тыс. т CO₂, в ГТС жилой многоквартирной и общественной застройки – 1,5 и 1,3 тыс. т соответственно, производственной и коммунально-складской – около 1,8 тыс. т, дорожно-транспортной инфраструктуры и спецтерриторий 0,6 и 0,2 тыс. т соответственно.

Оценка связи LST со средними для выделов значениями LAI и степенью озелененности выделов ГТС показала наличие значимых отрицательных связей: коэффициент детерминации равен 0,41 и 0,48 соответственно.

Исследования проведены при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках выполнения проекта № Х23КУБ-001.

Список использованных источников

1. Кренке, А. Н. Построение карты ландшафтного покрова на основе дистанционной информации / А. Н. Кренке, Ю. Г. Пузаченко // Экологическое планирование и управление. – 2008. – № 2 (7). – С. 10–25.
2. Яновский, А. А. Автоматизированная дистанционная экспресс-оценка расположения зарослей *Phragmites australis*, перспективных для заготовки энерготехнологической фитомассы / А. А. Яновский, О. В. Созинов // Растительные ресурсы. – 2017. – Т. 53, № 4. – С. 555–580.
3. Наземные и дистанционные методы оценки состояния экосистем особо охраняемых природных территорий / Д. Г. Груммо [и др.] ; под общ. ред. Д. Г. Груммо, А. В. Судника ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича. – Минск : Беларус. навука, 2023. – 351 с.
4. Кравчук, Л. А. Средоформирующие функции зеленой инфраструктуры города Витебска / Л. А. Кравчук, Н. М. Баженова, А. Н. Гайшун // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 127–137.
5. Кравчук, Л. А. Дистанционная оценка влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности основных геотехнических систем крупного города (на примере Минска) / Л. А. Кравчук, А. А. Яновский, Н. М. Баженова // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 71–82.
6. Кравчук, Л. А. Оценка влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности в различных геотехнических системах г. Могилёва / Л. А. Кравчук, А. А. Яновский, Н. М. Баженова // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 13–23.
7. Схема озелененных территорий общего пользования Железнодорожного, Новобелицкого, Советского, Центрального районов города Гомель // Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск : УП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА», 2020. – 54 с.
8. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C. J. Tucker // Remote Sens. Environ. – 1979. – Vol. 8, iss. 2. – P. 127–150. – DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
9. Sen2Cor 2.12. – 2024. – URL: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> (date of access: 09.10.2024).

10. Richter, R. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide / R. Richter, D. Schl pfer. – DLR IB 565-01/15. – 2016. – 263 p.
11. Mayer, B. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use / B. Mayer, A. Kylling // Atmos. Chem. Phys. – 2005. – Vol. 5. – P. 1855–1877. – DOI: 10.5194/acp-5-1855-2005.
12. Pignatale, F. C. Sen2Cor 2.12.03 Configuration and User Manual [Electronic resource]. – 10.09.2024. – URL: <https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.12.0/docs/OMPC.TPZG.SUM.002%20-%20i1r0%20-%20Sen2Cor%202.12.03%20Configuration%20and%20User%20Manual.pdf> (date of access: 09.10.2024).
13. Brodu, N. Super-resolving multiresolution images with band-independent geometry of multispectral pixels / N. Brodu // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 55, iss 8. – P. 4610–4617. – DOI: 10.1109/TGRS.2017.2694881.
14. Sentinel-2 Toolbox. – 2024. – URL: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox> (date of access: 09.09.2024).
15. Weiss, M. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 1.1) / M. Weiss, F. Baret. – 2016. – 53 p.
16. Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности : ЭкоНИП 17.01.06-001-2017 : утв. и введ. в действие постановлением Мин-ва природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 18.07.2017 № 5-Т. – URL: <https://www.ecoinfo.by/%D1%8D%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D0%BD%D0%BE%D1%80%D0%BC%D1%8B-%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%B0> (дата обращения: 09.10.2024).
17. Планировка и застройка населенных пунктов = Планіроўка і забудова населеных пунктаў : СН 3.01.03-2020 / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – 59 с.
18. Уткин, А. И. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование / А. И. Уткин, Л. С. Ермолова, И. А. Уткина ; отв. ред. С. Э. Вомперский ; Рос. акад. наук, Ин-т лесоведения. – М. : Наука, 2008. – 292 с.
19. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). – М., 2008. – 886 с.
20. Биогеоценотическое разнообразие Беларуси : информационно-моделирующая система / Г. И. Сачок, Д. В. Татьянак, В. В. Коляда [и др.]. – Минск, 1996. – 240 с.

References

1. Krenke A. N., Puzachenko Yu. G. *Postroenie karty landshaftnogo pokrova na osnove distancionnoj informacii* [Construction of map of landscape cover on the basis of the controlled from distance information]. *Ekologicheskoe planirovanie i upravlenie = Ecological planning and management*, 2008, no. 2 (7), pp. 10–25. (in Russian)
2. Yanovskiy A. A., Sozinov O. V. *Avtomatizirovannaya distancionnaya ekspress-ocenka raspolozheniya zaroslej Phragmites australis, perspektivnyh dlya zagotovki energotekhnologicheskoy fitomassy* [Automated remote express assessment of the location of Phragmites australis thickets, promising for harvesting energy-technological phyto-mass]. *Rastitelnye resursy = Plant resources*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 555–580. (in Russian)
3. Grummo D. G., e.a. *Nazemnye i distancionnye metody ocenki sostoyaniya ekosistem osobo ohranyaemykh prirodnih territorij* [Ground-based and remote sensing methods for assessing the state of ecosystems in specially protected natural areas]. Minsk, 2023, 351 p. (in Russian)
4. Kravchuk L. A., Bazhenova N. M., Haishun A. N. *Sredoformiruyushchie funktsii zelenoj infrastruktury goroda Vitebska* [Environment-forming function of green infrastructure of Vitebsk]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 127–137. (in Russian)
5. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M. *Distancionnaya ocenka vliyaniya rastitelnogo pokrova na temperaturu podstilayushej poverhnosti osnovnykh geotekhnicheskikh sistem krupnogo goroda (na primere Minska)* [Remote evaluation of the influence of vegetation cover on the land surface temperature in main geotechnical systems of the large city (by the example of Minsk)]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 71–82. (in Russian)
6. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M. *Ocenka vliyaniya rastitelnogo pokrova na temperaturu podstilayushej poverhnosti v razlichnykh geotekhnicheskikh sistemah g. Mogilyova* [Evaluation of the influence of vegetation cover on the temperature of the underlying surface in various geotechnical systems of Mogilev]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 13–23. (in Russian)
7. *Shema ozelenennykh territorij obshego polzovaniya Zheleznodorozhnogo, Novobelickogo, Sovetskogo, Centralnogo rayonov goroda Gomel* [Scheme of green areas for public use in Zheleznodorozhny, Novobelitsky, Sovetsky, Tsentralny districts of the city of Gomel]. Minsk, 2020, 54 p. (in Russian)
8. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 1979, vol. 8, iss. 2, pp. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
9. Sen2Cor 2.12. 2024. Available at: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> (accessed 9 October 2024).
10. Richter R., Schl pfer D. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide. DLR IB 565-01/15, 2016, 263 p.
11. Mayer B., Kylling A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.*, 2005, vol. 5, pp. 1855–1877. DOI: 10.5194/acp-5-1855-2005.
12. Pignatale F. C. Sen2Cor 2.12.03 Configuration and User Manual Available at: <https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.12.0/docs/OMPC.TPZG.SUM.002%20-%20i1r0%20-%20Sen2Cor%202.12.03%20Configuration%20and%20User%20Manual.pdf> (accessed 9 October 2024).
13. Brodu N. Super-resolving multiresolution images with band-independent geometry of multispectral pixels. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, vol. 55, iss. 8, pp. 4610–4617. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2694881.
14. Sentinel-2 Toolbox. 2024. Available at: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox> (accessed 9 September 2024).

15. Weiss M., Baret F. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 1.1). 2016, 53 p.
16. EkoNIP 17.01.06-001-2017. *Ohrana okruzhayushey sredy i prirodopolzovanie. Trebovaniya ekologicheskoy bezopasnosti* [Environmental norms and rules 17.01.06-001-2017 Environmental protection and nature management. Environmental safety requirements]. Available at: <https://www.ecoinfo.by/%D1%8D%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D0%BD%D0%BE%D1%80%D0%BC%D1%8B-%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%B0> (accessed 9 October 2024). (in Russian)
17. SN 3.01.03-2020. *Planirovka i zastroyka naselennykh punktov* = Planirovka i zabudova naselennykh punktau [Building regulations 3.01.03-2020 Planning and construction of settlements]. Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, Minstrojarkhitektury Publ., 2023, 59 p. (in Russian)
18. Utkin A. I., Ermolova L. S., Utkina I. A. *Ploshad poverhnosti lesnykh rastenij: sushnost, parametry, ispolzovanie* [Surface area of forest plants: essence, parameters, use]. Minsk, 2008, 292 p. (in Russian)
19. *Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnykh lesoobrazuyushih porod Severnoj Evrazii (normativno-spravochnye materialy)* [Tables and models of the growth and productivity of plantations of the main forest-forming species of Northern Eurasia (normative and reference materials)]. Minsk, 2008, 886 p. (in Russian)
20. Sachok G. I., Tatyank D. V., Kolyada V. V., Kamysenko G. A., Kolkovsky V. M., Rybka V. I. *Biogeocenoticheskoe raznoobrazie Belarusi: Informacionno-modeliruyushaya sistema* [Biogeocenotic diversity of Belarus: Information and modeling system]. Minsk, 1996. 240 p. (in Russian)

Информация об авторах

Кравчук Людмила Александровна – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kravchu-k@yandex.by

Яновский Александр Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanouski@ya.ru

Баженова Наталья Михайловна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: nata.bazh@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

Быкова Наталья Константиновна – кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: bnk_@tut.by

Книга Павел Витальевич – аспирант, младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: knigapv@mail.ru

Information about the authors

Lyudmila A. Kravchuk – Ph. D. (Geography), Leader Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kravchu-k@yandex.by

Aleksander A. Yanovskiy – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanouski@ya.ru

Natalia M. Bazhenova – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: nata.bazh@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 Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhyunach@gmail.com

Natalia K. Bykava – Ph. D. (Geography), Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: bnk_@tut.by

Pavel V. Kniga – Graduate Student, Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: knigapv@mail.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-51-63>
УДК 528.854+911.2

Поступила в редакцию 30.03.2025
Received 30.03.2025

ВЫЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ СОЛИГОРСКОГО КАЛИЙНОГО КОМБИНАТА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Цзян Чэнь, А. Н. Червань

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Исследована структура землепользования в горнодобывающем районе Солигорского калийного комбината в Беларуси по данным дистанционного зондирования (ДДЗ) для учета процессов деградации земельных и почвенных ресурсов. Выполнен анализ пространственно-временных характеристик пяти групп видов земель (пахотных, лесных, луговых земель, болот и водоемов) с использованием четырех вегетационных индексов (нормализованного индекса растительности NDVI, зеленого нормализованного индекса растительности GNDVI, почвенно-регулируемого индекса растительности SAVI и зеленого хлорофиллового индекса GCI). Исследование проводилось по 9 территориальным блокам в программной среде ArcGIS. Результаты позволили уточнить модели дешифрирования структуры землепользования на основе долевого участия групп видов земель. Оценена динамика вегетативных индексов в течение вегетативного периода. Коэффициенты детерминации (R^2) индексов для лесных, пахотных и луговых земель составили ряд $NDVI (0,78–0,82) > GNDVI (0,75–0,80) > SAVI (0,73–0,79) > GCI (0,69–0,77)$. Пространственный анализ по индексам NDVI и GNDVI указывает на существенное влияние содержания влаги в почве в границах луговых земель, роль интенсивности сельскохозяйственной деятельности на пахотных землях, а также недостаточную чувствительность индекса SAVI для дешифрирования водоемов и болот. Анализ динамики индексов NDVI, GNDVI, SAVI и GCI позволил оценить пространственную неоднородность землепользования в горнодобывающем районе для последующего анализа процессов деградации земельных и почвенных ресурсов.

Ключевые слова: вегетационные индексы; дешифрирование; землепользование; вид земель; деградация почв.

Для цитирования. Цзян Чэнь, Червань А. Н. Выявление структуры землепользования в зоне влияния Солигорского калийного комбината по данным дистанционного зондирования // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 51–63.

IDENTIFICATION OF LAND USE STRUCTURE IN THE ZONE OF INFLUENCE OF THE SOLIGORSK POTASH PLANT BASED ON REMOTE SENSING DATA

Jiang Chen, A. N. Chervan

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. The spatiotemporal characteristics of five land use types – arable land, forests, meadows, wetlands and water bodies – over an area of 8100 km² in the influence zone of the Soligorsk Potash Plant in Belarus using four vegetation indices (NDVI, GNDVI, SAVI and GCI) based on Sentinel-2A remote sensing data (March – September 2023) are analyzed in the article. The study was conducted on nine territorial blocks in the ArcGIS environment with the accuracy of land type interpretation using the weighted average method for 900 representative plots. The obtained results made it possible to refine the models for interpreting land use structure based on the share of land types, as well as the dynamics of vegetation indices during the growing season. The coefficients of determination (R^2) of the four vegetation indices for forest, arable and meadow lands are as follows: $NDVI (0.78–0.82) > GNDVI (0.75–0.80) > SAVI (0.73–0.79) > GCI (0.69–0.77)$. Spatial analysis of the NDVI and GNDVI indices specifies a significant influence of soil moisture within the boundaries of meadow lands, the role of agricultural intensity on arable lands and insufficient sensitivity of the SAVI index for interpreting water bodies and wetlands. The research results made it possible to assess the spatial heterogeneity of land use in the mining region for subsequent analysis of land and soil resource degradation processes.

Keywords: vegetation indices; decoding; land use; land type; soil degradation.

For citation. Jiang Chen, Chervan A. N. Identification of land use structure in the zone of influence of the Soligorsk potash plant based on remote sensing data. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 51–63.

Введение. Калийные ресурсы Беларуси играют решающую роль в сельскохозяйственном производстве и продовольственной безопасности на национальном и региональном уровне. Способствуя экономическому развитию, добыча калийных солей может оказывать неблагоприятное воздействие на экосистемы, особенно в связи с химической нагрузкой на почвы и растительный покров [1]. Индексы растительности, такие как нормализованный индекс растительности NDVI, нормализованный индекс зеленой растительности GNDVI, индекс растительности с поправкой на почву SAVI и индекс зеленого полога GCI как средство экологического и природоохранного мониторинга на основе технологии дистанционного зондирования позволяют количественно оценить состояние растительности с целью определения воздействия горных разработок на окружающую среду [2]. Горные разработки способствуют усилению эрозии почв, нарушению экологического баланса, химическому загрязнению окружающей среды, что приводит к деградации земель, снижению качества почв, сокращению биоразнообразия и т. д. [3]. Основной акцент представленных исследований сделан на определении структуры землепользования по данным дистанционного зондирования (ДДЗ) для формирования пространственной основы учета проявления деградации почвенного покрова и земельных ресурсов [4].

Объект и методы исследования. Основанный в 1958 г. в Солигорском районе «Белорусский калийный комбинат» производит около седьмой части мирового объема калийных удобрений [5]. В настоящее время действуют шесть калийных рудников и четыре перерабатывающих завода с годовым объемом производства 11,71 млн т, что составляет 17 % от общего мирового производства калийных удобрений и является третьим по величине в мире, с планами увеличения производства до 15,9 млн т в 2025 г. [6]. Процесс флотации для извлечения калийных минералов путем физического разделения и химического воздействия может сопровождаться просачиванием в почвенную среду химических соединений вместе со сточными водами и твердыми отходами. Хвостохранилища в горнодобывающем районе занимают значительные площади, сокращая растительный покров, вызывают просадочные явления в зоне влияния, через почвенно-грунтовые воды разрушают корневую систему естественной и культурной растительности. В 5-километровой зоне имеет место повышенная концентрация солей и химикатов, что может привести к засолению почв [7]. Ранее было отмечено, что риск засоления земель в этом районе добычи высок, и засоление имеет градиентное распределение, от терриконов в центре до дифференцированного распределения к периферии с большей степенью воздействия к западу [8]. Горячее выщелачивание, при котором калийные минералы растворяются при высоких температурах или с помощью химических растворителей, наносит более непосредственный и постоянный ущерб окружающей среде. Использование серной и соляной кислоты в условиях высокой температуры и давления, образующиеся кислые отходы в шламоохранилищах приводят к подкислению и засолению почвенного покрова. Высокотемпературная обработка также может активировать тяжелые металлы (например, мышьяк или кадмий) в руде, переводя их из стабильного в растворимое состояние и усугубляя риск химического загрязнения почвы [9]. Кроме того, горячее выщелачивание требует большого количества пресной воды для растворения руды, а чрезмерный забор воды может привести к понижению уровня грунтовых вод.

Солигорский горнопромышленный район расположен в Минской области Беларуси (52.79° с. ш., 27.54° в. д.), отличается умеренно-континентальным влажным климатом и достаточно неоднородными геоморфологическими условиями. Температура в этом горнодобывающем районе обычно колеблется между -7 °C и +25 °C. Средняя высота над уровнем моря составляет 150 м. Минимальное количество осадков выпадает в феврале, в среднем 12 мм, а максимальное – в июле, в среднем 70 мм. В связи с выраженной неоднородностью почвенного покрова территория исследования была разделена на девять блоков А–I с центром в Солигорском горнопромышленном районе, с длиной стороны каждого блока 30 км, для возможности сравнения изменений вегетационных индексов растительности по каждому блоку и анализа различий в структуре землепользования в горнопромышленном районе (рис. 1).

Для анализа ДДЗ были выбраны пять репрезентативных групп видов земель: лесные, пахотные, луговые, болота и водоемы. Ключевые участки по всем блокам исследования были сегментированы на квадраты с длиной стороны 100 м с помощью инструмента в комплексе ArcGIS, далее методом визуального дешифрирования было отобрано 150–200 соответствующих квадратов с равномерным распределением для каждого вида земель по территории исследования. Всего в геостатистическом анализе участвовало около 900 репрезентативных участков, что позволило эффективно повысить прогнозную точность моделей дешифрирования по каждому виду земель на основе вегетационных индексов отдельно и в сочетании.

В исследовании использовано 11 наборов космических снимков Sentinel-2A, сделанных в период с 19 марта по 30 сентября 2023 г. с пространственным разрешением 10 м [10]. Даты съемки сформированы исходя из анализа вегетационного индекса в сочетании с данными местного сайта климатических данных [4], что позволило определить начало и конец вегетационного периода: в Солигорске он обычно длится 5,6 месяца (170 дней) – примерно с 22 апреля по 9 октября [4].



Рис. 1. Территория в зоне влияния Солигорского горнопромышленного района

Fig. 1. Territory in the zone of influence of the Soligorsk mining district

Влияние горнодобывающей деятельности на растительный покров носит комплексный характер, и одним индексом анализа ДДЗ сложно оценить все варианты воздействия, поэтому использовано сочетание нескольких индексов: нормализованного индекса растительности NDVI, зеленого нормализованного индекса растительности GNDVI, почвенно-регулируемого индекса растительности SAVI и зеленого хлорофиллового индекса GCI. Из них NDVI является наиболее широко используемым индексом растительности, который может непосредственно реагировать на качество и количество биомассы, GNDVI более чувствителен к содержанию хлорофилла и водному стрессу растений, SAVI может уменьшить нарушение фона непокрытой почвы и подходит для малорастительных мест сброса или хвостохранилищ ($L = 0,5$), GCI очень чувствителен к концентрации хлорофилла в листьях и может напрямую реагировать на физиологический статус растений. Формулы и информация о четырех вегетационных индексах приведены в табл. 1.

Таблица 1. Индекс растительности и формула

Table 1. Vegetation index and formula

Индекс	Формула	Цитирование
GCI	$GCI = \frac{NIR}{Green} - 1$	Anatoly A. Gitelson [et al.], 2003 [11]
GNDVI	$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	Li Fenling [et al.], 2015 [12]
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Wang Zhengxing [et al.], 2003 [13]
SAVI	$SAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} \cdot (1 + L)$	Guo Yuchuan [et al.], 2011 [14]

Примечание. Отражение в диапазоне: NIR – инфракрасном ближнем; Red – красном; Green – зеленом.

Результаты исследования и их обсуждение. Территория в пределах 3 км от Солигорска покрыта техногенными поверхностями (31 %), сельскохозяйственными землями (27 %), водой (16 %) и древесно-кустарниковой растительностью (15 %); территория в пределах 16 км покрыта сельскохо-

зяйственными землями (49 %) и древесно-кустарниковой растительностью (26 %), а территория в пределах 80 км – лесной растительностью (46 %) и видами сельскохозяйственных земель (37 %) [4]. На исследуемой территории есть несколько групп видов земель, таких как земли под застройкой, пахотные земли, лесные земли, земли под древесно-кустарниковой растительностью (ДКР), луговые земли, земли под болотами, земли под поверхностными водными объектами.

Чтобы изучить структуру землепользования на исследуемой территории, площадь пикселей нескольких видов земель на снимках дистанционного зондирования была рассчитана в соответствии с табл. 2, рис. 2 и с процентным соотношением площади пикселей в девяти исследуемых кварталах А–І.

Таблица 2. Процентное соотношение групп видов земель на исследуемой территории, %

Table 2. Percentage ratio of land types in the study area, %

Вид земель	Блок А	Блок В	Блок С	Блок D	Блок Е	Блок F	Блок G	Блок Н	Блок І
Населенные пункты (1)	6,26	12,43	5,53	4,81	7,04	5,02	1,98	2,33	2,63
Земли под ДКР (2)	0,04	0,05	0,11	0,19	0,32	1,00	0,00	0,33	0,02
Лесные земли (3)	2,75	12,20	52,35	23,42	19,44	35,30	50,12	52,73	53,20
Луговые земли (4)	0,23	0,78	1,83	0,83	1,87	1,35	2,84	5,88	1,42
Водоемы и водотоки (5)	0,18	0,93	0,64	3,42	2,97	4,35	0,33	0,16	2,69
Поросль леса (6)	0,00	0,12	3,65	1,79	0,50	1,71	3,24	4,06	6,89
Пахотные земли (7)	89,29	72,12	35,80	64,62	67,18	51,00	41,39	34,47	33,06
Земли под постоянными культурами (8)	1,24	1,36	0,08	0,91	0,68	0,26	0,09	0,02	0,10

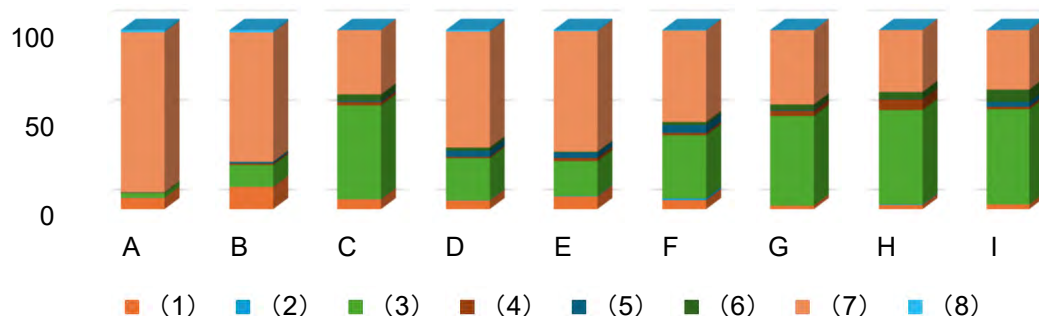


Рис. 2. Процентное соотношение групп видов земель на исследуемой территории

Fig. 2. Percentage of land types in the study area

Анализ структуры землепользования показывает, что в районе исследования блок А (82,29 % площади составляют пахотные земли и 1,24 % – земли под постоянными культурами) наиболее освоен сельским хозяйством. В блоках В, D и Е виды земель имеют схожую структуру: подавляющее большинство площади занимают пахотные земли, а 12,2–23,42 % – лесные. В блоках С, G, Н и І доля лесных земель составляет более 50 %, а доля пахотных земель снижается (30–40 %). В блоке F около 50 % занимают пахотные земли, а 38 % – естественная растительность. В целом в районе исследования пахотные земли возделываются в основном в северо-западном направлении от горнопромышленного района, а естественная растительность более выражена в юго-восточном направлении (около 50 % площади). Пахотные земли и лесные земли составляют большую часть выбранного района исследования – от 84,32 до 92,04 % суммарно. Поэтому для выявления деградации растительного (естественного и культурного) покрова в данном районе исследования необходимо использовать соответствующие индексы. В ходе интерпретации дешифровочных изображений на основании известного соотношения каждой группы видов земель на исследуемой территории (табл. 2) по каждому блоку внесены поправки. В табл. 3 приведены средние значения четырех индексов растительности (по всем точкам пикселей) для снимков дистанционного зондирования от 30 сентября 2023 г. в девяти исследуемых блоках. В соответствии с методом средневзвешенного значения (1) таким образом была учтена разная структура

землепользования по каждому из девяти блоков (табл. 4). По данным табл. 4 были построены кривые регрессии и вычислены коэффициенты детерминации (R^2) для четырех растительных индексов (рис. 3), показывающие тенденции изменения растительных индексов во времени и точность моделей для каждого из девяти блоков исследования.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i, \quad (1)$$

где S – синтез результатов; n – общее количество влияющих факторов; w_i – вес i -го фактора; x_i – значение i -го фактора.

Таблица 3. Индексы растительности для девяти исследуемых блоков по состоянию на 30.09.2023

Table 3. Vegetation index for the nine study blocks as of 30 September 2023

Блок	NDVI	GNDVI	SAVI	GCI
A	0,404984	0,380708	0,336374	1,48662
B	0,391220	0,375277	0,309952	1,41617
C	0,381983	0,371962	0,279228	1,31387
D	0,381879	0,363366	0,295498	1,29053
E	0,361994	0,352845	0,285861	1,18231
F	0,372661	0,367993	0,277627	1,19142
G	0,410049	0,388685	0,307149	1,33168
H	0,403679	0,386569	0,295312	1,26876
I	0,393584	0,391929	0,286857	1,09991

Таблица 4. Пересчитанное среднее значение индексов растительности по состоянию на 30.09.2023

Table 4. Recalculated mean value of vegetation indices as of 30 September 2023

Блок	NDVI	GNDVI	SAVI	GCI
A	0,404943	0,380669	0,336340	1,486471
B	0,391180	0,375239	0,309921	1,416028
C	0,381944	0,371924	0,279200	1,313738
D	0,381840	0,363329	0,295460	1,290400
E	0,361994	0,352845	0,285861	1,182310
F	0,372623	0,367956	0,277599	1,191300
G	0,410007	0,388646	0,307118	1,331546
H	0,403598	0,386491	0,295252	1,268506
I	0,393623	0,391968	0,286885	1,100019

Репрезентативные 900 участков для всех групп видов земель, как показано на рис. 4 (по 100 в каждом блоке исследований) способствовали увеличению пространственной точности. Выполненный анализ по 11 космическим снимкам спутника Sentinel-2A с марта по сентябрь 2023 г. показал, что пространственная точность четырех вегетационных индексов на всей территории исследования находится в ряду NDVI ($R^2 = 0,8745$) > SAVI ($R^2 = 0,869$) > GNDVI ($R^2 = 0,8483$) > GCI ($R^2 = 0,8319$).

Кривые регрессии и R^2 индексов NDVI на 900 исследуемых участках для четырех групп видов земель приведены на рис. 5. Обнаружено схожее вегетационное развитие растительности в лесах, на пахотных и луговых землях, а также на болотах, подтверждаемое значениями NDVI для каждой группы видов земель. Для трех видов земель R^2 NDVI имеют удовлетворительное значение – 0,78, 0,82 и 0,78 соответственно, с хорошей пространственной точностью [15]. На землях под болотами R^2 невысок и составляет 0,53 с плохой пространственной точностью, напрямую зависящей от изменения уровня воды в соотношении растительного покрова и обнаженности почвы. Аналогичным образом выполнен расчет индексов GNDVI, SAVI и GCI, результаты имеют схожие с NDVI характеристики.

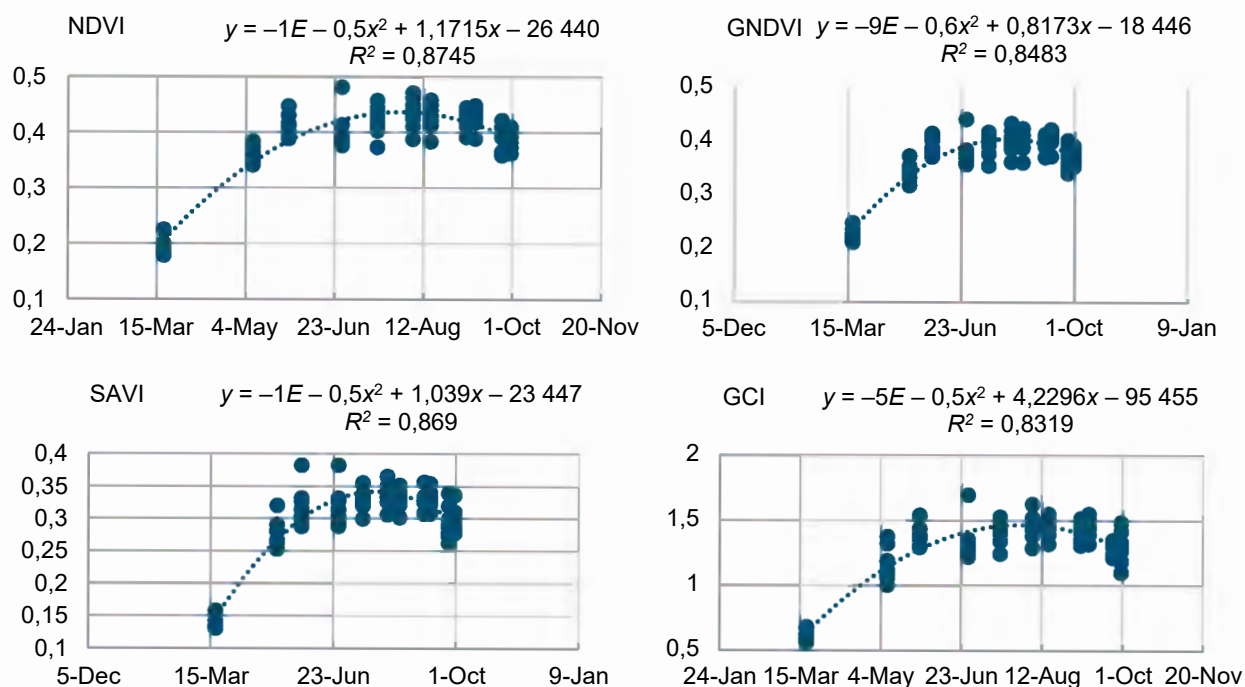


Рис. 3. Кривые регрессии и коэффициенты детерминации (R^2) для четырех индексов растительности, взвешенных по структуре землепользования

Fig. 3. Regression curves and coefficients of determination (R^2) for the four vegetation indices weighted by landholding structure

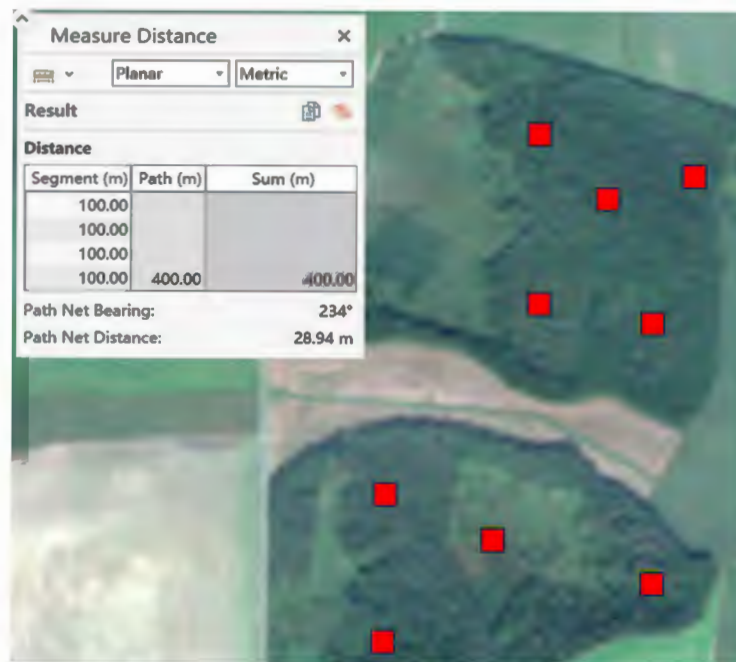


Рис. 4. Репрезентативные участки 100 м × 100 м для лесных земель

Fig. 4. Representative plots 100 m × 100 m for forest land type

Результаты анализа на рис. 5 и в табл. 5 подтверждают соотношение вегетационных индексов по уровню корреляции в ряду $NDVI > GNDVI > SAVI > GCI$ и более удовлетворительных значений для определения в структуре землепользования лесов, пахотных и луговых земель.

Динамика значений вегетационных индексов играет важную роль при определении моделей дешифрирования разных групп видов земель, поскольку указывает на вероятные отклонения в течение вегетационного периода. На рис. 6 показаны изменения четырех вегетационных индексов выбранных репрезентативных участков лесных земель по всем блокам в Солигорском горнопромышленном районе. Дата дистанционного зондирования предусматривает 11 вариантов в течение вегетации: 19 марта, 8 и 28 мая, 27 июня, 17 июля, 6 и 16 августа, а также 5, 10, 25 и 30 сентября.

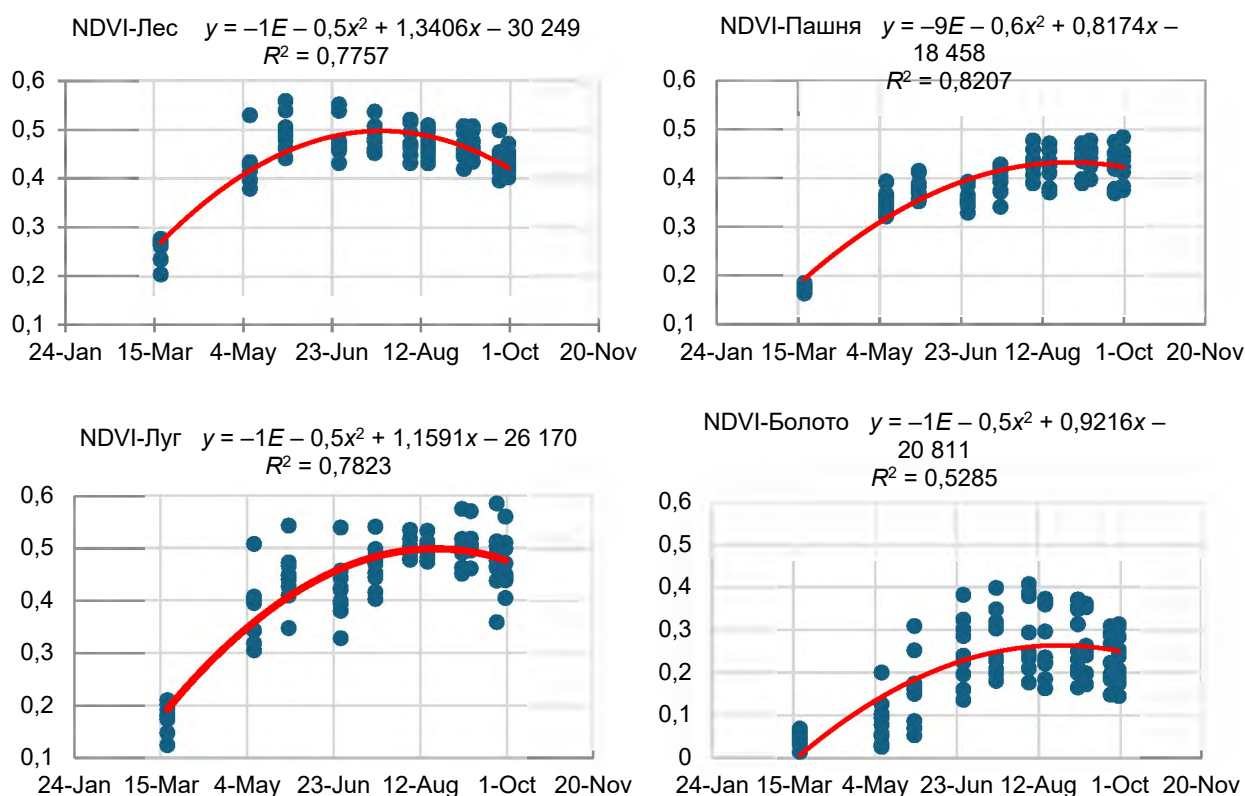


Рис. 5. Кривые регрессии NDVI для четырех видов земель: леса, пашни, луга и болота

Fig. 5. NDVI regression curves for four land types: forests, croplands, grasslands and wetlands

Таблица 5. Коэффициент детерминации R^2 вегетационного индекса для видов земель по всем девяти блокам исследования

Table 5. Determination coefficient R^2 of vegetation index for land types for all nine study blocks

R^2	Лес	Пашня	Луг	Болото
NDVI	0,7755	0,8207	0,7823	0,5285
GNDVI	0,7548	0,7966	0,7538	0,4564
SAVI	0,7353	0,7915	0,7274	0,4553
GCI	0,6930	0,7650	0,6913	0,4021

Как показано на рис. 6, динамика четырех вегетационных индексов относительно схожа, независимо от единиц измерения (GCI отличается от численных значений трех других индексов). Значительные максимумы четырех вегетационных индексов наблюдались в регионах А и G (NDVI = 0,55, GCI = 2,09). Более низкие значения обнаружены в блоках С, F и I (NDVI = 0,40, GCI = 1,24). Причина этого в большей продуктивности почв в западной части (блоки А, D, G), и следовательно, в более высоком содержании органического вещества [16]. Уровень засоления почв, более высокий уровень грунтовых вод или дополнительные лесоустроительные мероприятия как вероятные причины такого явления будут изучены в дальнейших исследованиях. В подтверждение наличия дополнительных факторов выступает меньшее количество санитарных и обслуживающих рубок ухода в разных блоках исследования.

Линии на графиках (рис. 6–8) в соответствии с датами съемки (период с марта по сентябрь) отражают постепенное увеличение вегетации с марта по май, ее стабилизацию и небольшое снижение ближе к сентябрю, что соответствует климатической норме в Солигорском районе.

Вегетационный индекс обрабатываемых пахотных земель во всех блоках (см. рис. 7) был одинаковым в ранневесенний период в марте, находясь в самой низкой точке ($NDVI = 0,17$, $GCI = 0,55$), и достигал среднего значения в мае ($NDVI = 0,36$, $GCI = 1,20$). Максимум в мае наблюдался в блоках А и Е ($NDVI = 0,41$, $GCI = 1,53$), максимум в июне – в блоках А и G ($NDVI = 0,39$, $GCI = 1,26$), минимум – в блоке F ($NDVI = 0,33$, $GCI = 1,01$). С середины июля до середины августа низкий экстремум был характерен для блока Е ($NDVI = 0,34$, $GCI = 1,13$), средние значения индексов – в блоке F ($NDVI = 0,45$, $GCI = 1,5$), а минимум в этот период наблюдался на территории блока G ($NDVI = 0,37$, $GCI = 1,17$). В сентябре вегетационные индексы были низкими в блоках D и F ($NDVI = 0,37$, $GCI = 1,27$) и высокими в блоке Е ($NDVI = 0,48$, $GCI = 1,7$). Все четыре вегетационных индекса имеют тенденцию к повышению в западной части района добычи и к постепенному снижению в восточной части исследуемого района.

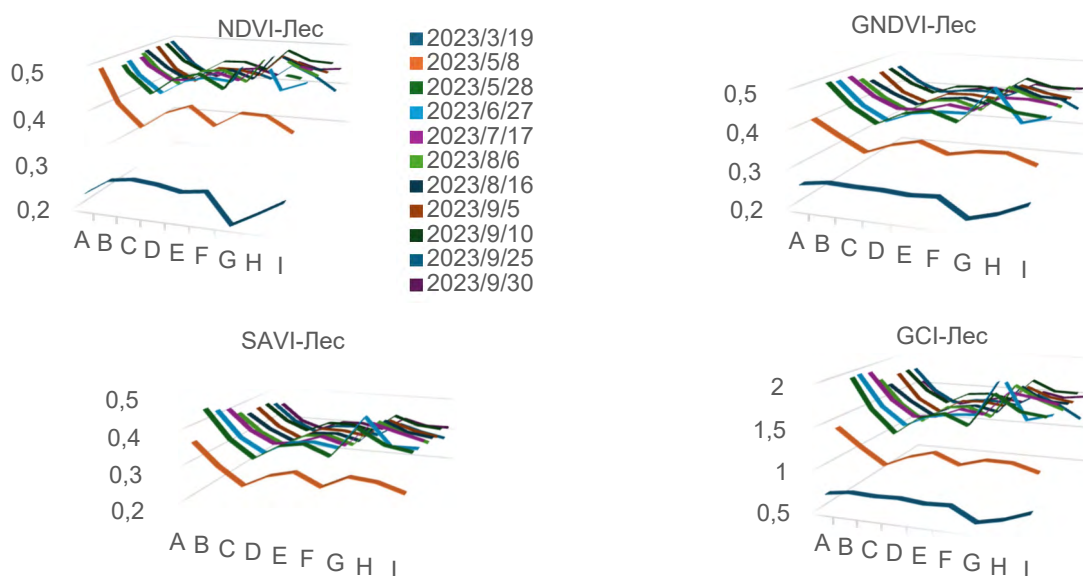


Рис. 6. Динамика индексов для лесной растительности по девяти исследуемым блокам за вегетационный период

Fig. 6. Dynamics of indices for forest vegetation in nine study blocks during the vegetation period

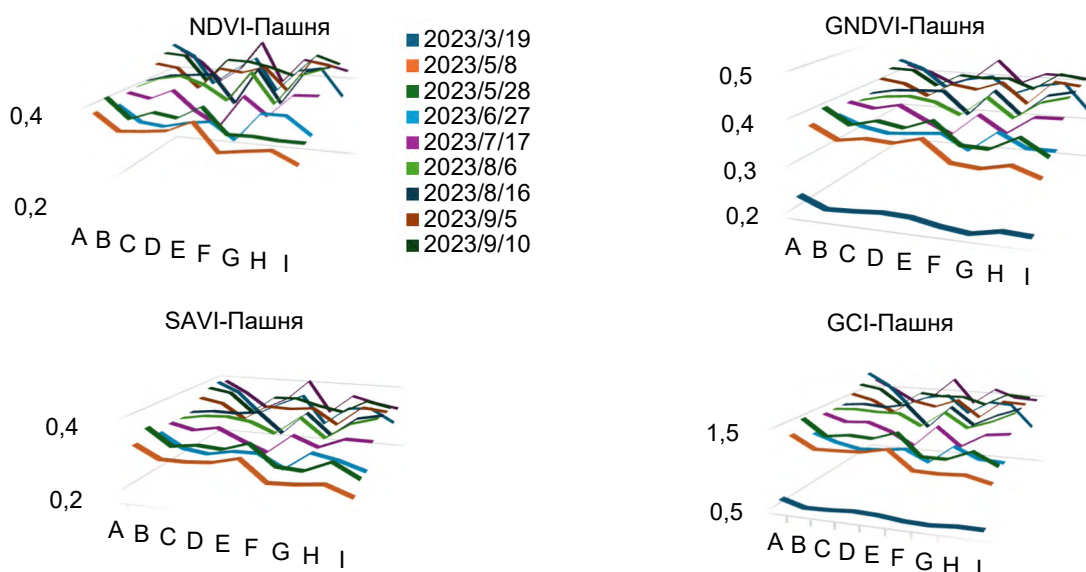


Рис. 7. Изменение индексов для пахотных земель по девяти исследуемым блокам

Fig. 7. Change in indices for cropland across the nine study blocks

Вегетационный индекс пахотных земель сильно зависит от антропогенных факторов и цикла роста культур. Весной и осенью он обычно выше в западной части исследуемой территории и постепенно снижается к востоку. Вегетационный индекс элементов пахотных земель сложнее, чем лесных, так как колебания его значений могут быть обусловлены особенностями обработки и посевов в зависимости от возделываемой культуры [17].

На рис. 8 показаны изменения вегетационных индексов по точкам отбора для луговых (пастбищных и сенокосных) земель в различных исследуемых блоках в том же хронологическом порядке. В границах луговых земель наблюдается постепенное увеличение, а затем уменьшение индексов с течением вегетационного периода. Вегетационный индекс лугов был высоким в блоке Н ($NDVI = 0,54$, $GCI = 1,90$), а в летние месяцы – в блоках А, С, Е и Н ($NDVI = 0,58$, $GCI = 2,12$). В целом можно сказать, что значения вегетационных индексов выше в западном регионе и постепенно снижаются к востоку. Причина этого может быть аналогична лесной растительности, луга в западной части исследуемого района имеют лучшие условия для развития луговых ассоциаций [18]. На рис. 8 блоки А и Н имеют очевидные высокие точки ($NDVI = 0,58$, $GCI = 2,12$), что объясняется наличием здесь лучше выраженной речной сети и приуроченности естественных лугов к пойменной ее части, что пропорционально увеличивает вегетационные индексы.

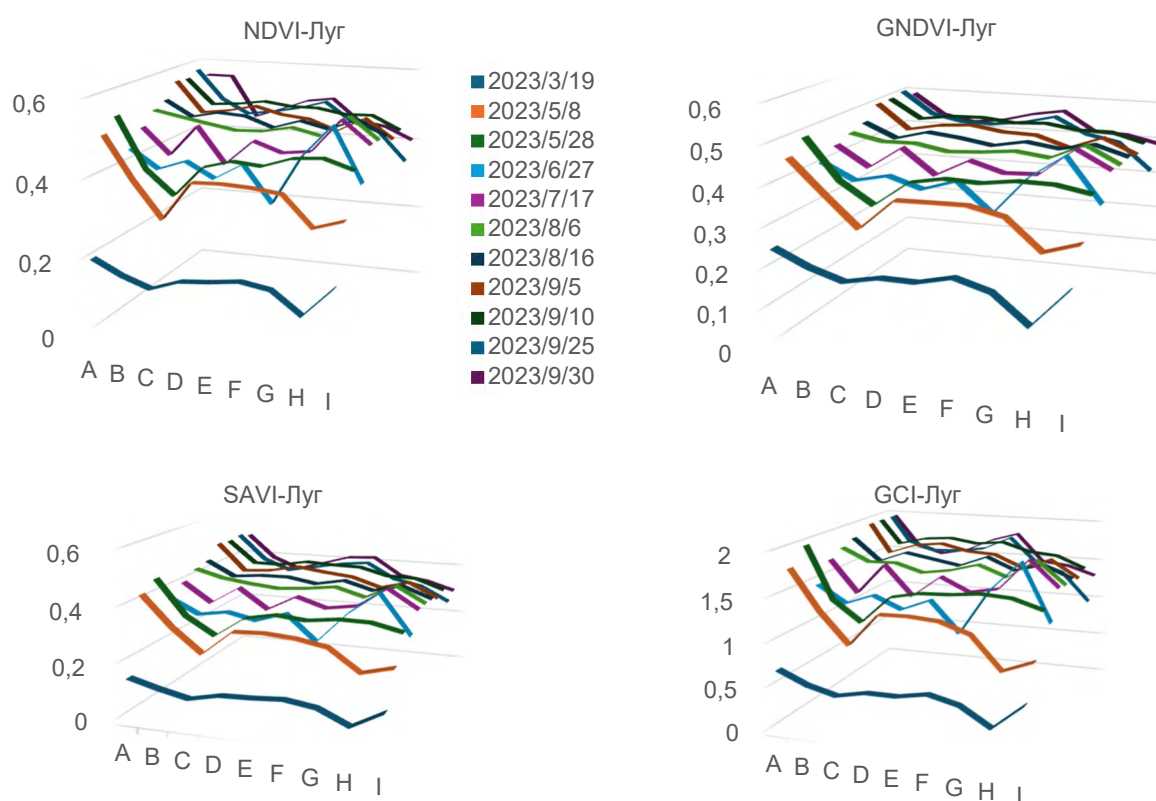


Рис. 8. Изменение индексов для луговых земель по девяти исследуемым блокам

Fig. 8. Change in indices for grassland across the nine study blocks

На рис. 9 показана вариация вегетационных индексов для выбранных репрезентативных участков болотных земель в том же хронологическом порядке. На рис. 9 блоки Е, F и I имеют высокие показатели ($NDVI = 0,41$, $GCI = 1,15$), что вызвано большим количеством здесь болот и заболоченных пойм и распространением болотной растительности. Степень заболоченности в блоках С и G выше, а площадь переувлажненных участков больше площади растительности. Это обуславливает низкие значения вегетационного индекса ($NDVI = 0,13$, $GCI = 0,25$). Сочетание болот и водоемов снижает эффективность вегетационного индекса [19, 20].

Анализ динамики различных вегетационных индексов в разных частях Солигорского горнопромышленного района показывает выраженную связь с почвенными условиями, предопределенными в большой степени генезисом почвообразующих пород и особенностями рельефа местности. В соответствии с приведенной картой геоморфологических условий на рис. 10 наблюдается достаточная

контрастность аккумулятивных и эрозионно-аккумулятивных поверхностей, в том числе связанных с границей сожского оледенения. Распространены пять форм рельефа, формирующие гидрогеологические и почвенные условия, определяющие вероятность проявления процессов деградации земель, вызванных влиянием Солигорского калийного комбината. Это грядово-холмистые и холмисто-краевые ледниковые формы рельефа, холмистые моренные равнины, волнистые и полуволнистые ледниковые равнины и низменности, плоские озера и аллювиальные низменности, флювиальные ледниковые равнины и низменности. В последующих исследованиях планируется провести соизмерение их границ с вегетационными индексами, дифференцирующими виды земель по количественной оценке состояния естественной и культурной растительности.

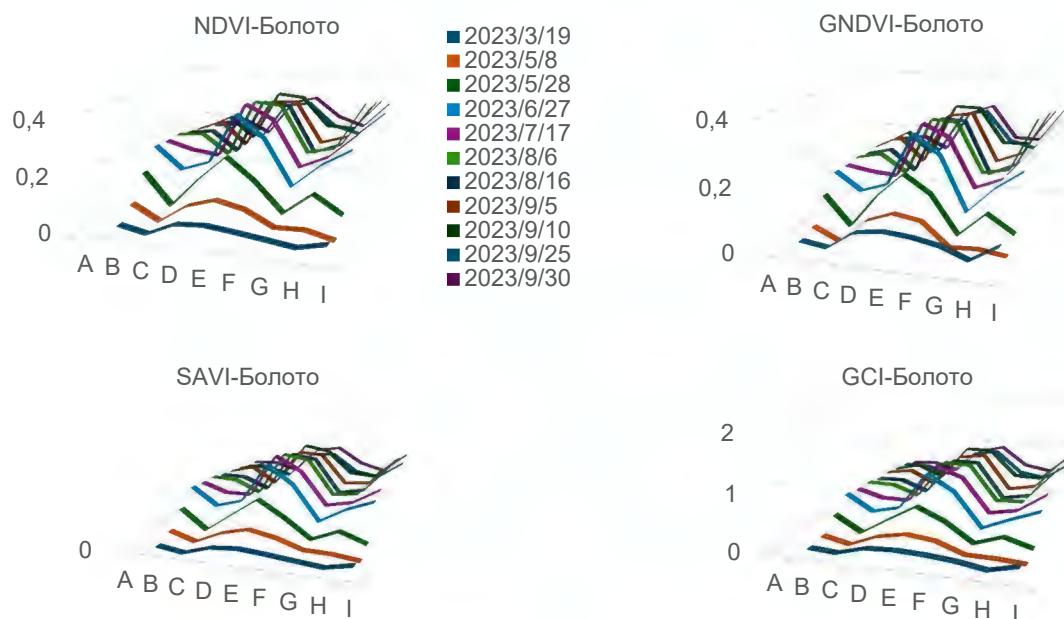


Рис. 9. Изменения индексов на землях под болотами по девяти исследуемым блокам

Fig. 9. Changes in indices on land under wetlands across the nine study blocks

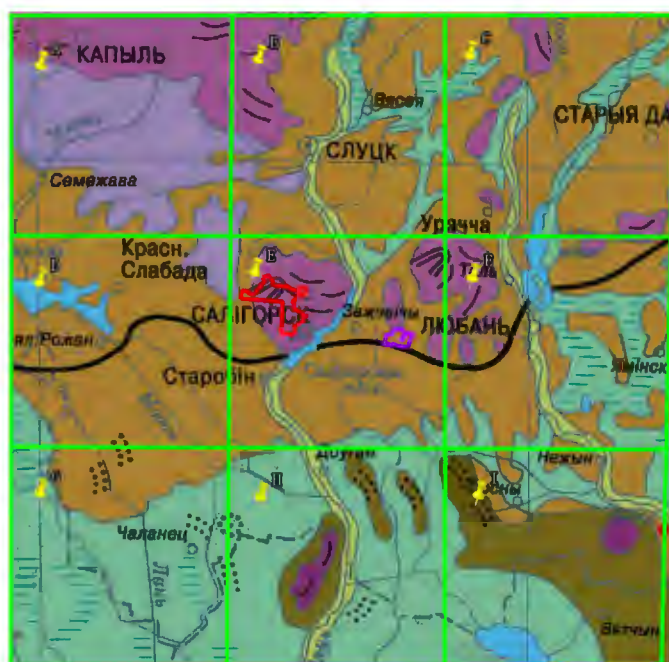


Рис. 10. Геоморфологические условия территории исследования [21]

Fig. 10. Geomorphologic conditions of the study area [21]

Заключение. В результате проведенных исследований на территории Солигорского горнопромышленного района определена структура землепользования по ДДЗ. Модель дешифрирования пяти групп видов земель по девяти территориальным блокам была уточнена (автокоррелирована) на основе их долевого участия, что позволило получить удовлетворительные результаты ($R^2 = 0,72-0,82$) по четырем из пяти видов землепользования. Анализ динамики индексов NDVI, GNDVI, SAVI и GCI позволил дифференцировать виды земель в зоне влияния Солигорского калийного комбината и произвести оценку состояния растительности в течение вегетационного периода.

Полученная структура землепользования открывает пути для дальнейшего пофакторного установления зависимости состояния почвенного и растительного покрова от природных (почвенных, гидрогеологических, геоморфологических и др.) и антропогенных факторов. Используемые методы машинного обучения и полученный оценочный ряд вероятностного дешифрирования по индексам $NDVI > GNDVI > SAVI > GCI$ позволят в дальнейшем пространственно выявить подобные закономерности.

Список использованных источников

1. 黄土高原露天煤矿复垦土壤-植被系统恢复力及协同—权衡关系 / 陈浮, 朱燕峰, 骆占斌, 等 // 煤炭学报. — 2024. — Vol. 49, № 11. — P. 4950–4602. = Устойчивость почвенно-растительной системы и синергетические эффекты при рекультивации открытых угольных шахт на лёссовом плато / Чэнь Фу, Чжу Яньфэн, Ло Чжаньбинь [и др.] // Журнал по изучению каменного угля. — 2024. — Vol. 49, № 11. — P. 4950–4602. — DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0326.
2. Study on the influence of mining disturbance on the variation characteristics of vegetation index: A case study of Lingwu Mining Area / Guo Yachao, Huang Yanli, Li Junmeng [et. al.] // Environmental Development. — 2023. — Vol. 45. — DOI: 10.1016/j.envdev.2023.100811.
3. 中国矿区土地退化因素调查: 概念、类型与方法 / 李海东, 沈渭涛, 司万童, 等 // 生态与农村环境学报. — 2015. — Vol. 31, № 4. — P. 445–451. = Исследование факторов деградации земель в горнодобывающих районах Китая: концепции, виды и методы / Ли Хайдун, Шэнь Вэйтао, Си Вантун, Ян Циньву // Экология и сельская среда. — 2015. — Vol. 31, № 4. — P. 445–451. — DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2015.04.001.
4. Климат и средняя погода круглый год в Солигорск : [сайт]. — Миннеаполис, 2024. — URL: <https://ru.weatherspark.com/y/95110/%D0%9E%D0%B1%D1%8B%D1%87%D0%BD%D0%B0%D1%8F-%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0-%D0%B2-%D0%A1%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%B3%D0%BE%D1%80%D1%81%D0%BA-%D0%91%D0%B5%D0%BB%D0%B0%D1%80%D1%83%D1%81%D1%8C-%D0%B2%D0%B5%D1%81%D1%8C-%D0%B3%D0%BE%D0%B4> (дата обращения: 01.03.2025).
5. Официальный сайт Республики Беларусь : [сайт]. — Минск, 2009–2025. — URL: <https://www.belarus.by/ru/business/brands-of-belarus> (дата обращения: 01.03.2025).
6. 白俄罗斯钾盐资源禀赋与投资环境分析 / 张宇轩, 李旭拓, 刘明义, 等 // 西北地址. — 2022. — Vol. 55, № 3. — P. 306–317. = Анализ обеспеченности калийными ресурсами и инвестиционной среды в Беларуси / Чжан Юйсюань, Ли Сютоу, Лю Минъи [и др.] // Северо-западная геология. — 2022. — Vol. 55, № 3. — P. 306–317.
7. 我国盐湖浮选提钾技术及机理 / 惠庆华, 权朝明, 张慧芳, 等 // 应用化工. — 2021. — Vol. 50, № 12. — P. 3414–3419. = Технология и механизм извлечения калия флотацией в соленом озере Китая / Хуэй Цинхуа, Цюань Чжаоми, Чжан Хуэйфань [и др.] // Прикладная химия. — 2021. — Vol. 50, № 12. — P. 3414–3419. — DOI: doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.2021.12.007.
8. Zhao Bochao. Spatial distribution of soils by salinization level in soligorsk district of Belarus / Zhao Bochao, Chervan Alexander // Почвенно-земельные ресурсы. — 2024. — Vol. 1. — P. 5–12.
9. 钾长石提钾技术进展 / 张晓慢, 雍倩禧, 祁梦瑶, 等 // 矿产保护与利用. — 2020. — Vol. 4. — P. 172–178. = Status and Prospect of Potassium Extracting from Potassium Feldspar / Чжан Сяома, Юн Цяньси, Ци Мэнъяо [и др.] // Сохранение и использование минеральных ресурсов. — 2020. — Vol. 4. — P. 172–178.
10. Взгляды Европы на Землю : [сайт]. — Брюссель, 2014–2025. — URL: <https://www.copernicus.eu/en> (дата обращения: 01.03.2025).
11. Gitelson, Anatoly A. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves / Anatoly A. Gitelson, Yuri Gritz, Mark N. Merzlyak // Journal of Plant Physiology. — 2003. — Vol. 160, № 3. — P. 271–282. — DOI: doi.org/10.1078/0176-1617-00887.
12. 基于高分一号卫星数据的冬小麦叶片SPAD值遥感估 / 李粉, 王力, 刘京, 等 // 农业机械学报. — 2015. — Vol. 46, № 9. — P. 273–281. = Оценка величины SPAD для листьев пшеницы с помощью дистанционного зондирования на основе данных GF-1 / Ли Фенлинг, Ван Ли, Лю Цзин, Чанг Цинжуй // Труды Китайского общества сельскохозяйственной техники. — 2015. — Vol. 46, № 9. — P. 273–281. — DOI: doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.040.
13. 王正兴. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI / 王正兴, 刘闯. // 生态学报. — 2003. — Vol. 23, № 5. — P. 979–987. = Ван Чжэнсин. Прогресс в исследовании индекса растительности: от AVHRR-NDVI до MODIS-EVI / Ван Чжэнсин, Лю Чуань // Китайский экологический акт. — 2003. — Vol. 23, № 5. — P. 979–987.

14. 郭玉川. 基于MODIS的干旱区植被覆盖度反演及植被指数优选 / 郭玉川, 何英, 李霞 // 国土资源遥感. – 2011. – Vol. 2. – P. 115–118. = Го Юйчуань. Инверсия растительного покрова и оптимизация вегетационного индекса в засушливых районах на основе MODIS / Го Юйчуань, Хэ Ин, Ли Ся // Дистанционное зондирование земли и ресурсов. – 2011. – Vol. 2. – P. 115–118.
15. Akhona Madasa. Application of geospatial indices for mapping land cover/use change detection in a mining area / Akhona Madasa, Israel R. Orimoloye, Olusola O. Ololade // Journal of African Earth Sciences. – 2021. – Vol. 175. – P. 104–108. – DOI: doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104108.
16. Bascietto Marco. Spatial Variations of Vegetation Index from Remote Sensing Linked to Soil Colloidal Status / Bascietto Marco, Enrico Santangelo, Claudio Beni // Land. – 2021. – Vol. 10, № 1. – P. 80. – DOI: https://doi.org/10.3390/land10010080.
17. Orimoloye, I. R. Spatial evaluation of land-use dynamics in gold mining area using remote sensing and GIS technology / I. R. Orimoloye, O. O. Ololade // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2020. – Vol. 17, № 11. – P. 4465–4480. – DOI: 10.1007/s13762-020-02789-8.
18. 基于 Landsat 8 和随机森林的青海门源天然草地上生物量遥感估 / 赵翊含, 侯蒙京, 冯琦, 等. // 草业学报. – 2022. – Vol. 31, № 7. – P. 1–14. = Оценка с помощью дистанционного зондирования надземной биомассы естественных пастбищ в Мэньюане, Цинхай, на основе данных Landsat 8 и случайных лесов / Чжао Ихань, Хоу Мэнцзин, Фэн Цишэн [и др.] // Журнал пастбищной науки. – 2022. – Vol. 31, № 7. – P. 1–14.
19. 植物物种多样性无人机高光谱遥感反演研究 / 唐希颖, 李化哲, 崔丽娟, 等 // 地球信息科学. – 2024. – Vol. 26, № 8. – P. 1954–1974. = Инверсия видового разнообразия водно-болотных растений с использованием гиперспектральных данных БПЛА / Тан Сиин, Ли Хуачжэ, Цуй Лицзюань [и др.] // Журнал геоинформационных наук. – 2024. – Vol. 26, № 8. – P. 1954–1974. – DOI: 10.12082/dqxkx.2024.240055.
20. 廖程浩. MODIS数据水体识别指数的识别效果比较分析 / 廖程浩, 刘雪华 // 国土资源遥感. – 2008. – Vol. 4. – P. 22–27. = Ляо Чэньхао. Сравнительный анализ эффективности индексов идентификации водных объектов по данным MODIS / Ляо Чэньхао, Liu Xuehua // Дистанционное зондирование земельных ресурсов. – 2008. – Vol. 4. – P. 22–27.
21. Геоморфологическая карта // Национальный атлас Беларуси. – Минск : Белкартография, 2002. – С. 67.

References

1. Chen Fu, Zhu Yanfeng, Luo Zhanbin, et al. Soil-Vegetation System Resilience and Synergies – Trade-Offs in Reclaiming Surface Coal Mines on The Loess Plateau. *Journal of Chian Coal Science*, 2024, vol. 49, pp. 4950–4602. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0326. (in Chinese)
2. Yachao Guo, Yanli Huang, Junmeng Li, Shenyang Ouyang, Laiwei Wu, Wenyue Qi. Study on the influence of mining disturbance on the variation characteristics of vegetation index: A case study of Lingwu Mining Area. *Environmental Development*, 2023, vol. 45. DOI: 10.1016/j.envdev.2023.100811.
3. Li Haidong, Shen Weishou, Si Wantong, Yan Qingwu. Investigation of Driving Factors of Land Degradation in Mine Areas in China: Concept, Types and Approaches. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, vol. 3, pp. 445–451. DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2015.04.001. (in Chinese)
4. *Klimat i srednyaya pogoda kruglyj god v Soligorske* [Climate and average weather all year round in Soligorsk]. 2025. Available at: <https://ru.weatherspark.com/y/95110/%D0%9E%D0%B1%D1%8B%D1%87%D0%BD%D0%B0%D1%8F%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D0%B2%D0%A1%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%B3%D0%BE%D1%80%D1%81%D0%BA%D0%91%D0%B5%D0%BB%D0%B0%D1%80%D1%83%D1%81%D1%8C%D0%B2%D0%B5%D1%81%D1%8C-%D0%B3%D0%BE%D0%B4> (accessed 1 December 2025). (in Russian)
5. *Oficial'nyj sajt Respubliki Belarus'* [Official Website of the Republic of Belarus]. 2025. Available at: <https://www.belarus.by/cn/business/brands-of-belarus> (accessed 1 December 2025). (in Russian)
6. Zhang Yuxuan, Li Xutuo, Liu Mingyi, Gao Yongwei, Zhang Dandan. Analysis of Potash Resource Endowment and Investment Environment in Belarus. *Northwestern Geology*, vol. 5, pp. 306–317. DOI: 10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.03.025. (in Chinese)
7. Hui Qinghua, Quan Zhaoming, Zhang Huifang, et al. Potassium extraction technology and mechanism by flotation in China's salt lake. *Applied Chemical Industry*, 2021, vol. 50, pp. 3414–3419. DOI: doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.2021.12.007. (in Chinese)
8. Zhao Bochao, Chervan A. N. Spatial distribution of soils by salinization level in Soligorsk district of Belarus. *Soil and Land Resources*, 2024, vol. 1, pp. 5–12.
9. Zhang Xiaoman, Yong Qianxi, Qi Mengyao, Sun Zhifu, Cao Peiyi, Peng Weijun. Status and Prospect of Potassium Extracting from Potassium Feldspar. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, vol. 40, no. 4, pp. 172–178. DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.04.021. (in Chinese)
10. Vzglady Evropy na Zemlyu [Copernicus Eurpes eyes on Earth]. 2025. Available at: <https://www.copernicus.eu/en> (accessed 1 December 2025). (in Russian)
11. Anatoly A. Gitelson, Yuri Gritz, Mark N. Merzlyak. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 2003, vol. 16, pp. 271–282. DOI: doi.org/10.1078/0176-1617-0088.
12. Li Fenling, Wang Li, Liu Jing, Chang Qingrui. Remote Sensing Estimation of SPAD Value for Wheat Leaf Based on GF-1 Data. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, vol. 4, pp. 273–281. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.040. (in Chinese)

13. Wang Zhengxing, Liu Chuang, Huete Alfredo. Progress in Vegetation Index Research: From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, vol. 2, pp. 979–987. (in Chinese)
14. Guo Yuchuan, He Ying, Li Xia. Vegetation coverage inversion and vegetation index optimization in arid areas based on MODIS. *Remote Sensing of Land and Resources*, 2011, vol. 2, pp. 115–118. (in Chinese)
15. Akhona Madasa, Israel R. Orimoloye, Olusola O. Ololade. Application of geospatial indices for mapping land cover/use change detection in a mining area. *J. of African Earth Sciences*, 2021, vol. 175, pp. 104–108. DOI: doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104108.
16. Bascietto Marco, Enrico Santangelo, Claudio Beni. Spatial Variations of Vegetation Index from Remote Sensing Linked to Soil Colloidal Status. *Land*, 2021, vol. 1, pp. 80. DOI: doi.org/10.3390/land10010080.
17. Orimoloye R., Ololade O. O. Spatial evaluation of land-use dynamics in gold mining area using remote sensing and GIS technology. *International J. of Environmental Science and Technology*, 2020, vol. 1, pp. 4465–4480. DOI: 10.1007/s13762-020-02789-8.
18. Zhao Yihan, Hou Mengjing, Feng Qisheng, e. a. Remote sensing estimation of aboveground biomass of natural grassland in Menyuan, Qinghai based on Landsat 8 and random forests. *J. of Grassland Science*, 2022, vol. 3, pp. 1–14. (in Chinese)
19. Tang Xiyang, Li Huazhe, Cui Lijuan, Zhao Xinsheng, Zhai Xiajie, Lei Yinru, Li Jing, Wang Jinzhi, Li Wei. Inversion of Wetland Plant Species Diversity Using UAV Hyperspectral Data. *J. of Earth Information Science*, 2024, vol. 2, pp. 1954–1974. DOI: 10.12082/dqxkx.2024.240055. (in Chinese)
20. Liao Chenghao, Liu Xuehua. Comparative analysis of the identification effectiveness of water body identification indices from MODIS data. *Remote sensing of land resources*, 2008, vol. 4, pp. 22–27. (in Chinese)
21. *Geomorfologicheskaya karta* [Geomorphological map]. *Natsional'nyi atlas Belarusi = National Atlas of Belarus*. Minsk, Belkatografiya Publ., 2002, pp. 67. (in Russian)

Информация об авторах

Цзян Чэнь – аспирант факультета географии и геоинформатики БГУ (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: sweenei1j@gmail.com

Червань Александр Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики БГУ (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: ChervanAlex@mail.ru

Information about the authors

Jiang Chen – Post Graduate Student, Belarusian State University (16, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: sweenei1j@gmail.com

Chervan Alexander Nikolaevich – Ph. D. (Agriculture), Associate Professor, Head of Department of Soil Science and Geoinformatic, Faculty of Geography and Geoinformatic, Belarusian State University (16, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: ChervanAlex@mail.ru

ОЦЕНКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИРОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ МАЛЫХ ГОРОДОВ БЕЛАРУСИ

Ю. А. Романкевич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлена оценка геоэкологического потенциала природных комплексов 76 малых городов Беларуси. Предложено ее методическое обоснование, базирующееся на совместном учете факторов его формирования – естественной устойчивости природных комплексов, степени их сохранности и антропогенных воздействий. Выполнены частные оценки по факторам формирования и обобщающая – по величине геоэкологического потенциала малых городов Беларуси, проведены их соответствующие группировки. Выявлена зависимость величины потенциала от природно-ландшафтных условий размещения городов, установлен самый низкий его уровень в случае их приуроченности к ландшафтам лёссовым, холмисто-моренно-эрозионным, аллювиально-террасированным и нерасчлененным речным долинам. Определены приоритетные направления деятельности по оптимизации городской среды, исходя из полученных оценок и группировок городов.

Ключевые слова: геоэкологический потенциал; устойчивость ландшафтов; антропогенное воздействие; типология малых городов.

Для цитирования. Романкевич Ю. А. Оценка геоэкологического потенциала природных комплексов малых городов Беларуси // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 64–72.

ASSESSMENT OF THE GEOECOLOGICAL POTENTIAL OF NATURAL COMPLEXES OF SMALL TOWNS IN BELARUS

Ju. A. Ramankevich

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

Abstract. The assessment of the geoecological potential of natural complexes of 76 small towns in Belarus is presented. Its methodological justification is proposed, which is based on the joint consideration of the factors of its formation (natural stability of natural complexes, the degree of their preservation and anthropogenic impacts). Assessments have been made on the factors of formation and on the magnitude of geoecological potential of small towns in Belarus, their corresponding groupings have been carried out. The dependence of the potential on the natural and landscape conditions of the location of cities has been revealed. The lowest level of potential has been established in the case of their confinement to loess landscapes, hilly-moraine-erosion, alluvial-terraced and undivided river valleys. Priority areas of activity for the optimization of the urban environment have been determined.

Keywords: geoecological potential; landscape stability; anthropogenic impact; typology of small towns.

For citation. Ramankevich Ju. A. Assessment of the geoecological potential of natural complexes of small towns in Belarus. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 64–72.

Введение. Обязательной составной частью планирования устойчивого городского развития является экологическая составляющая. Главное ее назначение – обеспечение в городах благоприятной окружающей среды.

Для эффективного решения указанной задачи важно иметь представление не только о современном состоянии городской среды и направленности его изменений, но и о потенциальных возможностях местных природных комплексов поддерживать ее должное качество. Для оценки таких возможностей применяется понятие геоэкологического (природно-ресурсного, экологического, природоохранного) потенциала.

Отмеченное понятие не получило однозначной трактовки [1]. В обобщенном варианте под таким понимается система природных комплексов, условий, явлений и процессов, которые обеспечивают благоприятные экологические условия жизни человека как биологического вида и социального организма [2].

Объектами изучения по оценке геоэкологического потенциала выступают природные системы [3], ландшафты [4], природные компоненты [5]. Исследования затрагивают территории различных категорий, как природные [6, 7], так и административные [1, 8 и др.].

По отношению к городам вопросы изучения геоэкологического потенциала проработаны недостаточно, хотя их геоэкологические исследования проводятся по широкому спектру направлений, связанных с оценкой окружающей среды, рациональным использованием природных ресурсов, обеспечением экологической безопасности. Как правило, они затрагивают крупные и крупнейшие городские поселения, а также агломерации, где экологические проблемы проявляются наиболее отчетливо. Городам меньшей величины уделяется меньше внимания. Особенно это касается таковых, относящихся к категории малых, исследования которых носят фрагментарный характер.

Вместе с тем для указанной категории городов также нужны решения по научному обоснованию их перехода к устойчивому развитию. Подобное обоснование должно опираться на учет природно-экологической специфики этих городов. Представление о такой специфике можно получить путем оценки их геоэкологического потенциала.

Цель работы – оценить геоэкологический потенциал природных комплексов малых городов Беларуси.

Задачи исследования:

- разработка методического обоснования оценки геоэкологического потенциала города;
- проведение оценки данного потенциала для малых городов Беларуси и их группировка по его величине.

Объекты, материалы и методы исследования. Объектами исследования выступили малые города Беларуси. К данной категории в нашей стране относятся поселения с численностью населения до 20 тыс. человек (СН 3.01.03 2020 «Планировка и застройка населенных пунктов»). Всего насчитывается 76 таких городов.

Численность населения малых городов Беларуси изменяется следующим образом: от минимального значения – 1386 тыс. человек (2024 г.) до максимального – 18 994 тыс. человек (2024 г.), при среднем значении – 10 892,6 тыс. человек. Аналогичные показатели по площади составляют 3,35; 22,60; 11,16 км² соответственно.

Малые города распределены по территории страны относительно равномерно. В их природно-ландшафтном строении принимают участие 12 из имеющихся в Беларуси 14 родов ландшафтов.

Половина малых городов приурочена к группе средневысотных ландшафтов (50 %), тогда как к низинным – 29 %, к возвышенным – 21 % (рис. 1).

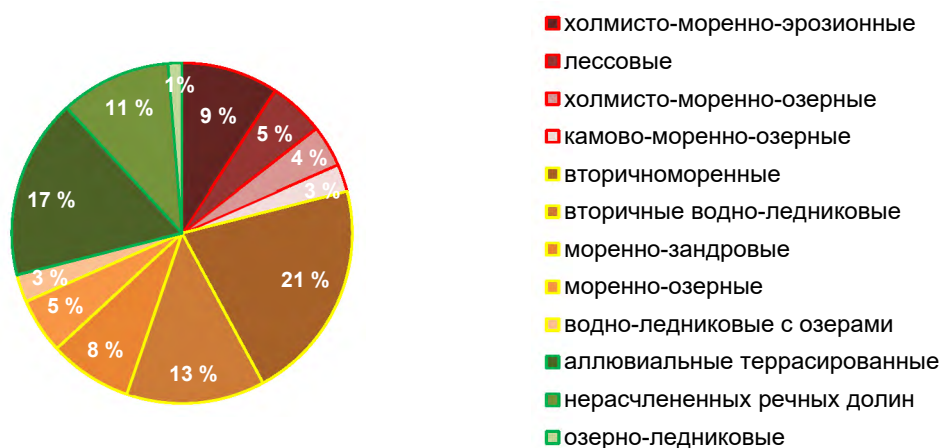


Рис. 1. Распределение малых городов Беларуси по родам ландшафтов

Fig. 1. Distribution of small towns in Belarus by landscape type

Материалами для исследования послужили данные государственной статистической отчетности, картографические, энциклопедические и литературные источники.

Методическую основу исследования составил метод балльной оценки. Он является типичным для исследований подобного рода. При этом набор показателей, используемых разными авторами для оценки, различается, что, очевидно, является следствием решаемых задач.

Применительно к рассматриваемому геоэкологическому потенциалу природных комплексов городов приоритетное значение имеют показатели, отражающие их способность к формированию состояния

городской среды. На этом основании в качестве предмета анализа выбраны три группы показателей, характеризующих, во-первых, устойчивость природных комплексов и компонентов к внешним воздействиям, во-вторых, антропогенно обусловленные их структурные изменения, в-третьих, оказываемые на данные комплексы и компоненты техногенные воздействия.

Результаты и их обсуждение. Устойчивость природных комплексов к антропогенному воздействию в малых городах. Факторы и показатели оценки устойчивости систематизированы с применением ландшафтного подхода [9]. Определение состояния ландшафта осуществляли с использованием совокупности показателей, отражающих как естественно присущие ему свойства, так и оказываемые на него нагрузки [10, 11]. Выявлены пять природных факторов: литолого-геоморфологический [12], гидрогеологический [13], ландшафтно-геохимический [14, 15], почвенно-геохимический [16, 17] и биологический [13].

Использовали систему показателей, определяющих степень устойчивости ландшафтов (устойчивые, относительно устойчивые, неустойчивые) на основании балльной оценки отдельно по каждому показателю, фактору, а также интегрально для каждого города и рода ландшафта (табл. 1).

Таблица 1. Показатели устойчивости ландшафтов

Table 1. Indicators of landscape stability

Показатели устойчивости ландшафта	Ландшафты по категории устойчивости		
	Устойчивые	Относительно устойчивые	Неустойчивые
<i>Инженерно-геоморфологический критерий (литолого-геоморфологический фактор) [12]</i>			
Вертикальное расчленение, м/км ²	<5	5,0–15,0	15,0–40,0
Горизонтальное расчленение, км/км ²	<0,4	0,4–0,7	>0,7
Уклоны, °	<2	2–4	>4
Длина склонов, км	>0,6	0,6–0,4	<0,4
Поверхностные отложения	Пески разнотернистые, суглинки безвалунные	Пески разнотернистые, супеси и суглинки лёссовидные	Моренные супеси, супеси и суглинки лёссовидные
Допустимые размывающие скорости покровных отложений, м/с	0,3–1,0	0,55–1,00	0,65–1,3
Интенсивность крипа, мм/год	<2,0	2,0–4,0	>4,0
Величина смыва, мм/год	<0,04	0,04–0,8	0,8–4,0
Плотность форм линейной эрозии, ед/10 км ²	<2	2–4	>4
Активные овраги, % от общего числа	1	1–4	>4
Гравитационные процессы, проявления	–	+	+
Суффозионные процессы, плотность, шт/км ²	–	10–20	>30
Карстовые процессы, проявления*	–	+	+
Просадочные процессы, проявления	–	+	+
Затопление	–	–	+
Русловые процессы	–	–	+
<i>Гидрогеологический критерий (изменение УГВ) [13]</i>			
Глубина залегания грунтовых вод, м	>5	2–5	<2
<i>Ландшафтно-геохимический (накопление загрязняющих веществ) [15]</i>			
Соотношение элювиальных выделов к супераквальным	С заметным преобладанием элювиальных над супераквальными, 2 : 1 и выше	С примерно одинаковым соотношением элювиальных и супераквальных, 1 : 1 и 2 : 2	С преобладанием супераквальных над элювиальными, 2 : 1 и выше
<i>Почвенно-геохимический критерий (сорбционный процесс) [16, 17]</i>			
Гранулометрический состав почв	Песчаные	Супесчаные	Суглинистые, органогенные
<i>Биологический критерий (сведение растительности) [13]</i>			
Смыв почв, мм/г	–	<3 и/или >2	>3
Развитие линейной эрозии, %	<2		>2

*Результатом этого явилась интегральная оценка устойчивости геосистемы малых городов с выделением четырех групп городов на основании вычисления средних значений: с высоким уровнем воздействия (>3,0), относительно высоким (2,5–3,0), средним (2,0–2,5) и низким (<2,0).

Примечание. Знаком «–» отмечено отсутствие, знаком «+» – наличие.

Определены группы городов с разной степенью устойчивости ландшафтов (рис. 2, а, табл. 2). В результате выяснено, что низкой степенью устойчивости природной среды характеризуются все города, расположенные в пределах лёссовых (100 % выборки), а также холмисто-моренно-эрозионных, нерасчлененных речных долин и аллювиально-террасированных ландшафтов (по 71,4 % выборки). Города данной группы определены как неустойчивые в отношении трех, реже двух, факторов. Так, лёссовые и холмисто-моренно-эрозионные неустойчивы по литолого-геоморфологическому фактору, что обеспечено для лёссовых ландшафтов развитием суффозионных и просадочных процессов, а для холмисто-моренно-эрозионных – склоновых, флювиальных и др. Также они неустойчивы по почвенно-геохимическому (преобладают суглинистые и органогенные почвы) и биологическому (высокие показатели смыва почв и развития линейной эрозии делают ландшафты неустойчивыми к сведению растительности) факторам.

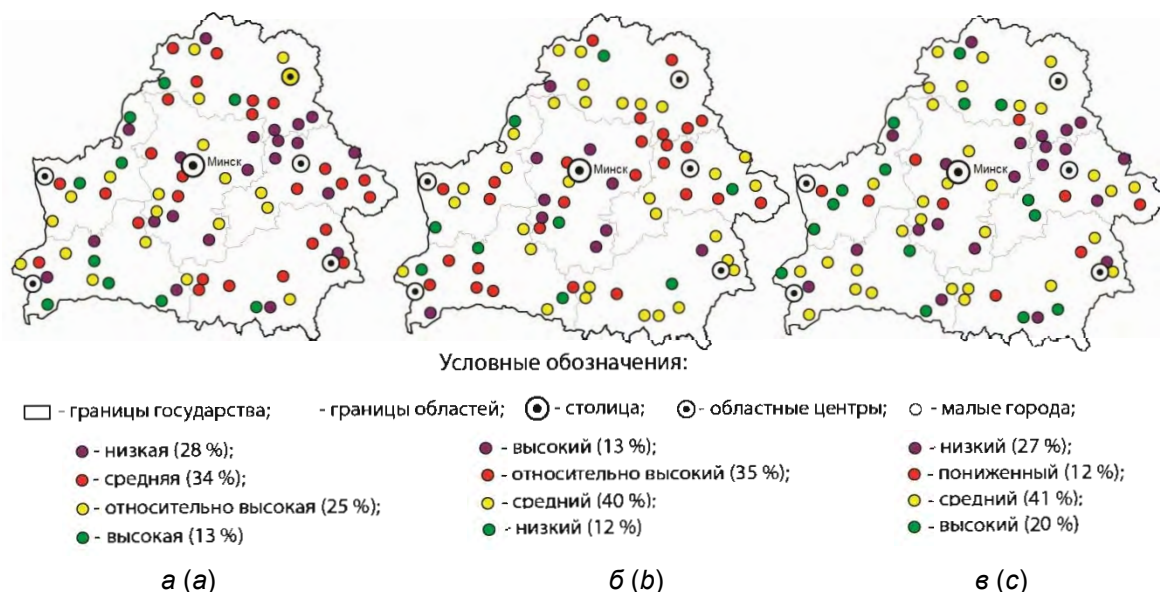


Рис. 2. Оценка степени устойчивости (а), уровня антропогенного воздействия (б) / и геоэкологического потенциала (в) малых городов Беларуси

Fig. 2. Assessment of the degree of sustainability (a), the level of anthropogenic impact (b) and the geo-ecological potential (c) of small towns in Belarus

Таблица 2. Ранжирование малых городов Беларуси по степени устойчивости

Table 2. Ranking of of small towns in Belarus by degree of sustainability

Степень устойчивости	Названия городов
Низкая	Барань, Бельнич, Березино, Верхнедвинск, Ветка, Давид-Городок, Дубровно, Жабинка, Заславль, Клецк, Копыль, Косово, Круглое, Крупки, Любань, Мстиславль, Наровля, Ошмяны, Славгород, Толочин, Шклов
Средняя	Браслав, Буда-Кошелево, Быхов, Василевичи, Воложин, Глубокое, Дисна, Добруш, Дятлово, Житковичи, Каменец, Климовичи, Костюковичи, Ляховичи, Мядель, Новолукомль, Петриков, Сенно, Скидель, Туров, Узда, Фаниполь, Чаусы, Чашники, Чериков, Чечерск
Относительно высокая	Берёзовка, Высокое, Ганцевичи, Городок, Докшицы, Дрогичин, Кировск, Кличев, Логойск, Микашевичи, Миоры, Мосты, Несвиж, Пружаны, Свислочь, Старые Дороги, Столбцы, Хойники, Червень
Высокая	Белозёрск, Ельск, Иваново, Ивье, Лепель, Малорита, Островец, Поставы, Столин, Щучин

Города в пределах ландшафтов нерасчлененных речных долин неустойчивы по гидрогеологическому (к изменению УГВ), ландшафтно-геохимическому (по интенсивности поступления загрязняющих веществ), а также литолого-геоморфологическому (развитие флювиальных и склоновых процессов, затопление, размыв берегов) факторам, аллювиально-террасированные – по ландшафтно-геохимическому и почвенно-геохимическому факторам (см. табл. 2).

Высокая и относительно высокая степень устойчивости характерны для городов в пределах вторично-водно-ледниковых ландшафтов и характеризуют 90 % городов группы как устойчивые и относительно устойчивые по всем оценочным показателям. Города, расположенные в пределах озерных ландшафтов, характеризуются высокой, относительно высокой и средней степенью устойчивости. Среди них представлены холмисто-моренно-озерные, камово-моренно-озерные, водно-ледниковые с озерами, моренно-озерные, озерно-ледниковые а также моренно-зандровые. Всех их объединяет неустойчивость по двум факторам – почвенно-геохимическому и литолого-геоморфологическому на фоне общей устойчивости по остальным. Для них характерно развитие процессов переработки берегов водоемов и затопления (см. табл. 2).

Города, расположенные в пределах вторичноморенных и аллювиальных террасированных ландшафтов, распределены по выделяемым группам от обладающих высоким потенциалом, до тех, у которых низкий потенциал вследствие неустойчивости по литолого-геоморфологическому, ландшафтно-геохимическому и почвенно-геохимическому факторам (см. табл. 2).

Антропогенное воздействие на природные комплексы малых городов. В основе оценки – опасность проявления в ландшафте неблагоприятных процессов, связанных с изменением их структуры и состава в ответ на воздействие [18]. Для оценки антропогенного воздействия на структуру природных комплексов малых городов использовали показатели сохранности природных геосистем ($I_{СПГ}$) (1) (согласно М. Н. Брилевскому [19]) и измененности природных геосистем ($I_{ИПГ}$) (2), рассчитанный по аналогии с (1) по данным земельного кадастра (на 01.01.2024). Также оценивали сохранение растительного разнообразия фитоценозов ($I_{СРР}$) (3) (на основании Рыбарски и Гайссе [20]) с учетом устойчивости к антропогенным нагрузкам. Химическую нагрузку на геосистему города оценивали по показателю плотности выбросов (4) (на основании данных [21]). В свою очередь, соотношение $I_{СПГ}$ и $I_{ИПГ}$ определяло баланс сохраненных и измененных геосистем в городах, с учетом степени сохранения одних и интенсивности преобразования других (табл. 3).

$$I_{СПГ} = (2S_{бол.} + 1,75S_{лес} + 1,5S_{луг} + 1,25S_{вод.} + S_{дкр} + 0,75S_{сх}) / S_{общ.}, \quad (1)$$

$$I_{ИПГ} = (2S_{застр.} + 1,75S_{дор.} + 1,5S_{иные} + 1,25S_{наруш.} + S_{неисп.} + 0,75S_{общпольз.}) / S_{общ.}, \quad (2)$$

$$I_{СРР} = (1,79S_{бол.} + 1,68S_{ест.луг} + 1,68S_{заб.луг} + 1,63S_{лес} + 1,5S_{вод.} + 1,43S_{дкр} + 1,38S_{сад} + 1,14S_{пах.}) \cdot 0,7S_{эроз.} / S_{общ.}, \quad (3)$$

$$p = \text{Выбросы}_{вал.} / S_{общ.} \quad (4)$$

Таблица 3. Оценочные показатели антропогенного воздействия на геосистемы городов

Table 3. Estimated indicators of anthropogenic impact on urban geosystems

Степень воздействия	Оценка антропогенного воздействия на геосистемы					
	по сохранности геосистем			I _{СРР}	ρ, т/км ²	Балльная оценка, балл
	I _{СПГ}	I _{ииг}	Доля СПГ от площади города, %			
Низкая	≥1,0–0,5	<1,0	≥40	>0,50	<3	1
Средняя	0,5–0,3	1,0–1,2	25–40	0,30–0,50	3–9	2
Высокая	<0,3	>1,2	<20	0,10–0,30	>9	3

Интегральная оценка антропогенного воздействия на геосистемы малых городов проведена с выделением четырех групп городов на основании вычисления средних значений: с высоким уровнем воздействия ($> 3,0$), относительно высоким ($2,5-3,0$), средним ($2,0-2,5$) и низким ($< 2,0$) (см. рис. 2, б).

Оценка антропогенного воздействия позволила дифференцировать города по интенсивности воздействия. Так, среди городов, расположенных в пределах лёссовых ландшафтов, около 75 % из них характеризуются высоким и относительно высоким уровнями воздействия к 25 % городов со средним и низким. Города в пределах ландшафтов речных долин охарактеризованы близким соотношением – 71,4 % : 28,6 %.

Наименьшая интенсивность воздействия характеризовала моренно-озерные (0 % : 100 %), холмисто-моренно-озерные (33,3 % : 66,7 %), аллювиальные террасированные (38,5 % : 61,6 %) и вторичные водно-ледниковые ландшафты (40,0 % : 60 %). Различия по интенсивности воздействия в городах, расположенных в пределах остальных родов ландшафтов не столь значительны.

Высокая интенсивность воздействия в городах, расположенных в пределах лёссовых, холмисто-моренно-эрозионных и ландшафтов речных долин, во многом связана с исторически сложившимися культурными традициями освоения территорий: высокие плодородные почвы, развивающиеся на лёссовых отложениях; приуроченность к стратегическим объектам (долинам рек), а также к участкам рельефа с высоким оборонительным и энергетическим потенциалом.

Проведение оценки химической нагрузки на геосистемы малых городов позволила установить различия по степени воздействия на основании плотности выбросов по городам [21]. Так, высокая степень воздействия, проявляющаяся в плотности выбросов выше 9 т/км², характеризовала 6,6 % малых городов: Микашевичи (69,48 т/км²), Новолукомль (28,69), Костюковичи (18,31), Верхнедвинск (12,97), Любань (9,78 т/км²).

Средней степени воздействия (от 3 до 9 т/км²) отмечено большинство городов (59,2 %): Барань, Белоозёрск, Березино, Берёзовка, Браслав, Буда-Кошелево, Быхов, Воложин, Высокое, Глубокое, Городок, Докшицы, Дубровно, Дятлово, Житковичи, Иваново, Ивье, Кировск, Климовичи, Кличев, Крупки, Лепель, Логойск, Малорита, Миоры, Мосты, Мядель, Несвиж, Петриков, Поставы, Пружаны, Сенно, Скидель, Старые Дороги, Столбцы, Столин, Толочин, Туров, Фаниполь, Чаусы, Чашники, Червень, Чечерск, Шклов, Щучин.

Низкая степень воздействия (от 0,6 до 3 т/км²) выявлена для 34,6 % городов, таких как Бельиничи, Василевичи, Ветка, Ганцевичи, Давид-Городок, Дисна, Добруш, Дрогичин, Ельск, Жабинка, Заславль, Каменец, Клецк, Копыль, Косово, Круглое, Ляховичи, Мстиславль, Наровля, Островец, Ошмяны, Свислочь, Славгород, Узда, Хойники, Чериков.

Результатом интегральной оценки воздействия на геосистемы малых городов явилось ранжирование городов (табл. 4).

Таблица 4. Ранжирование малых городов Беларуси по уровню антропогенного воздействия на природную среду

Table 4. Ranking of small towns in Belarus by the level of anthropogenic impact on the natural environment

Уровень воздействия	Названия городов
Высокий	Буда-Кошелево, Воложин, Логойск, Любань, Малорита, Несвиж, Поставы, Старые Дороги, Столбцы, Червень
Относительно высокий	Барань, Белоозёрск, Бельиничи, Березино, Берёзовка, Быхов, Верхнедвинск, Городок, Дрогичин, Дубровно, Дятлово, Жабинка, Заславль, Иваново, Клецк, Костюковичи, Круглое, Крупки, Микашевичи, Новолукомль, Петриков, Пружаны, Скидель, Славгород, Толочин, Узда, Шклов
Средний	Браслав, Ветка, Высокое, Ганцевичи, Глубокое, Добруш, Докшицы, Ельск, Житковичи, Ивье, Кировск, Климовичи, Кличев, Лепель, Ляховичи, Миоры, Мосты, Мстиславль, Мядель, Наровля, Ошмяны, Сенно, Столин, Туров, Фаниполь, Хойники, Чаусы, Чашники, Чечерск, Щучин
Низкий	Василевичи, Давид-Городок, Дисна, Каменец, Копыль, Косово, Островец, Свислочь, Чериков

Оценка геоэкологического потенциала представляла собой производную от оценки устойчивости и оценки антропогенного воздействия. Результатом проведения такой оценки стало выделение четырех групп городов: с высоким (>3,0), средним (2,5–3,0), пониженным (2,0–2,5) и низким (<2,0) геоэкологическим потенциалом. Результатом оценочных работ явилась серия картосхем (см. рис. 2, в).

Группу городов с высоким потенциалом характеризует состояние относительного равновесия, в котором развитие негативных процессов, согласно факторам устойчивости, сведено к минимуму; со средним – достаточный запас терпимости геосистем сдерживает развитие негативных антропогенных процессов; с пониженным – превышение пределов терпимости (адаптивности, толерантности) геосистемы и, как следствие, развитие кризисных состояний при повышении уровня воздействия.

Города с низким потенциалом характеризуются низким природным потенциалом устойчивости, что обеспечивает развитие кризисных ситуаций при любом уровне воздействия, к ним отнесены города в пределах лёссовых, холмисто-моренно-эрозионных и ландшафтов нерасчлененных речных долин (табл. 5).

Ранжирование малых городов Беларуси по геоэкологическому потенциалу позволило выделить четыре группы городов по степени его сохранности с учетом принадлежности к возвышенным/средне-высотным/низинным ландшафтам, %:

– с высоким потенциалом – характеризует 19,7 % городов, среди них – с наиболее высокой и высокой устойчивостью при низком и среднем уровне воздействия, выявляет соотношение ландшафтов в группе городов по высотности (6,7 : 73,3 : 20,0) с преимущественным распространением

в пределах средневысотных, среди которых 82 % приходится на вторичные водно-ледниковые и вторичноморенные;

– со средним потенциалом (40,9 % городов) – при соразмерных уровнях устойчивости и воздействия (наиболее высокий – наиболее высокий; наиболее высокий – высокий; высокий – высокий; средний – средний, а также средний – низкий), характеризует соотношение (12,9 : 61,3 : 25,8) с наибольшим распространением среди средневысотных ландшафтов (вторичноморенных и водно-ледниковых, а также моренно-озерных и моренно-зандровых), в меньшей степени низинных (аллювиально-террасированных) и возвышенных (камово-моренно-озерных);

– с пониженным потенциалом (11,8 % городов) – при пониженной устойчивости относительно уровня воздействия (средний – высокий и средний – наиболее высокий), демонстрирует соотношение (22,2 : 55,6 : 22,2) с распространением преимущественно в пределах средневысотных ландшафтов (вторичноморенных и моренно-зандровых);

– с низким потенциалом (27,6 % городов) – при низком уровне устойчивости и разных уровнях воздействия, соотношение (42,9 : 9,5 : 47,6) указывает на преобладающее распространение городов группы среди низменных (аллювиально-террасированных и нерасчлененных речных долин) и возвышенных ландшафтах (холмисто-моренно-эрозионных и лёссовых).

Таблица 5. Ранжирование малых городов Беларуси по геоэкологическому потенциалу

Table 5. Ranking of small towns in Belarus by geoeological potential

Геоэкологический потенциал	Названия городов
Низкий	Барань, Бельнич, Березино, Верхнедвинск, Ветка, Давид-Городок, Дубровно, Жабинка, Заславль, Клецк, Копыль, Косово, Круглое, Крупки, Любань, Мстиславль, Наровля, Ошмяны, Славгород, Толочин, Шклов
Пониженный	Буда-Кошелево, Быхов, Воложин, Дятлово, Костюковичи, Новолукмль, Петриков, Скидель, Узда
Средний	Белоозёрск, Берёзовка, Браслав, Василевичи, Глубокое, Городок, Дисна, Добруш, Дрогичин, Житковичи, Иваново, Каменец, Климовичи, Логойск, Ляховичи, Малорита, Микашевичи, Мядель, Несвиж, Поставы, Пружаны, Сенно, Старые Дороги, Столбцы, Туров, Фаниполь, Чаусы, Чашники, Червень, Чериков, Чечерск
Высокий	Высокое, Ганцевичи, Докшицы, Ельск, Ивье, Кировск, Кличев, Лепель, Миоры, Мосты, Островец, Свислочь, Столин, Хойники, Щучин

Закключение. Предложенное методическое обоснование количественной оценки геоэкологического потенциала малых городов, основанное на совместном учете формирующих ее факторов – естественной устойчивости природных комплексов, степени их сохранности и антропогенных воздействий, позволяет определить состояние городской среды и направления деятельности по ее оптимизации.

Полученные группировки малых городов по величине и факторам формирования геоэкологического потенциала их природных комплексов дают возможность выбора для каждой из этих групп приоритетных направлений оптимизационной деятельности. Первостепенное внимание при проведении городского экологического планирования, очевидно, следует уделить группе городов с самым низким геоэкологическим потенциалом.

Из состава указанной группы по отношению к городам, расположенным в пределах возвышенных ландшафтов: лёссовых (Барань, Дубровно, Круглое, Мстиславль) и холмисто-моренно-эрозионных (Воложин, Заславль, Клецк, Копыль, Косово, Логойск, Ошмяны), наиболее важны меры по предотвращению, во-первых, линейной и плоскостной эрозии почв, во-вторых, развития суффозионных и просадочных процессов. Применительно к городам, приуроченным к низинным ландшафтам: аллювиальным террасированным (Берёзовка, Василевичи, Ветка, Давид-Городок, Добруш, Жабинка, Житковичи, Микашевичи, Мосты, Наровля, Петриков, Славгород, Туров) и нерасчлененных речных долин (Бельнич, Березино, Дисна, Кличев, Крупки), особое значение имеют меры по предотвращению подтопления территории.

Установленные для всех городов показатели вклада разных источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу – мобильных или стационарных – позволяют определить адресные меры по их снижению. Кроме того, для группы городов с наиболее высокой плотностью таких выбросов (Микашевичи, Новолукмль, Костюковичи) и, соответственно, повышенной опасностью их накопления в депонирующих природных компонентах, особенно значимым выступит мониторинг загрязнения почв.

Список использованных источников

1. Забураева, Х. Ш. Геоэкологический потенциал и перспективы развития регионов Северо-Восточного Кавказа / Х. Ш. Забураева, Е. В. Краснов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 787–801.
2. Родзевич, Н. Н. Геоэкологический потенциал России / Н. Н. Родзевич // География в школе: теорет. науч.-метод. журнал. – 2001. – № 1. – С. 16–23.
3. Реймерс, Н. Ф. Природопользование : словарь-справочник / Н. Ф. Реймерс. – М. : Мысль, 1990. – 638 с.
4. Исаченко, А. Г. Экологический потенциал ландшафта / А. Г. Исаченко // Известия Всесоюзного географического общества (ВГО). – 1991. – Т. 123, вып. 4. – С. 305–316.
5. Прозоров, Л. Л. Энциклопедический словарь. Геоэкология / Л. Л. Прозоров ; Рос. акад. естествен. наук, Ин-т проблем природопользования. – М. : Научный мир, 2004. – 393 с.
6. Брилевский, М. Н. Геоэкологическая оценка природоохранного потенциала физико-географических регионов Беларуси / М. Н. Брилевский, Н. В. Гагина, Е. В. Морозов // Вестник Белорусского государственного университета. – Серия 2, Химия. Биология. География. – 2009. – № 2. – С. 88–93.
7. Владимиров, И. Н. Экологический потенциал геосистем Байкальской Сибири : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.36 / Владимиров Игорь Николаевич. – Иркутск, 2020. – 44 с.
8. Токарчук, С. М. Геоэкологическая оценка природоохранного потенциала административных районов Беларуси (как один из методов оценки репрезентативности сети ООПТ) / С. М. Токарчук // Псковский регионологический журнал. Природа и экология. – 2016. – № 3 (27). – С. 31–45.
9. Марцинкевич, Г. И. Градостроительство и архитектура: современность и перспективы : в 2 ч. / Г. И. Марцинкевич. – Минск, 1998. – 51 с.
10. Мухина, Л. И. Принципы и методы технологической оценки природных комплексов / Л. И. Мухина. – М., 1973. – 164 с.
11. Факторы и механизмы устойчивости геосистем : сб. науч. ст. / АН СССР, Ин-т географии ; отв. ред. Т. П. Куприянова. – М., 1989. – 329 с.
12. Инженерно-геоморфологическая оценка экзогенной динамики рельефа Беларуси / А. И. Павловский, А. Н. Галкин, В. Л. Моляренко, С. В. Андрушко // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5, Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2022. – № 2. – С. 72–84.
13. Методические рекомендации по учету строения и устойчивости ландшафтов при решении задач размещения народнохозяйственных объектов в составе региональных планов. – Минск, 1998. – 73 с.
14. Касимов, Н. С. Экогеохимия ландшафтов / Н. С. Касимов ; М-во природных ресурсов и экологии Рос. Федерации, Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, географ. фак. – М., 2013. – 207 с.
15. Струк, М. И. Методика оценки устойчивости к внешним воздействиям природной среды административных районов Беларуси / М. И. Струк, В. А. Бакарасов // Вестник Белорусского государственного университета. – Сер. 2, Химия, биология, география. – 2003. – № 1. – С. 64–69.
16. Хомич, В. С. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси / В. С. Хомич, С. В. Какарека, Т. И. Кухарчик ; НАН Беларуси, Ин-т проблем использ. природ. ресурсов и экологии. – Минск : Минсктиппроект, 2004. – 259 с.
17. Ранжирование городов Беларуси по устойчивости почв к техногенным химическим нагрузкам / В. А. Рыжиков, Ю. А. Романкевич, С. В. Савченко, Р. М. Зайнь Эль-Динь // Природные ресурсы. – Минск, 2019. – С. 15–22.
18. Губин, В. Н. Методика среднемасштабного эколого-географического картографирования / В. Н. Губин, М. В. Фадеева, В. Е. Волков. – Минск, 1994. – С. 28.
19. Брилевский, М. Н. Природоохранный потенциал физико-географических районов Беларуси и его значение для национальной экологической сети / М. Н. Брилевский // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2023. – № 2. – С. 17–30.
20. Рыбарски, И. Влияние состава угодий на экологическую стабильность территории / И. Рыбарски, Э. Гайссе // Землеустроительные работы в специфических условиях. – Татранска Ломница, 1988. – С. 19–26.
21. Государственный кадастр атмосферного воздуха : информ. бюл. 2020 г. / под ред. А. И. Волкович, М. А. Ереско. – Минск, 2021. – 34 с.

References

1. Zaburaeva H. Sh., Krasnov E. V. *Geoekologicheskij potencial i perspektivy razvitiya regionov Severo-Vostochnogo Kavkaza* [Geoecological potential and development prospects of the Northeast Caucasus regions]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*, 2014, vol. 3, pp. 787–801. (in Russian)
2. Rodzevich N. N. *Geoekologicheskij potencial Rossii* [Geoecological potential of Russia]. *Geografiya v shkole. Teoreticheskij nauchno-metodicheskij zhurnal = Geography at School. A Theoretical Scientific and Methodological Journal*, 2001, vol. 1, pp. 16–23. (in Russian)
3. Rejmers N. F. *Prirodopol'zovanie* [Environmental management]. Moscow, 1990, 638 p. (in Russian)
4. Isachenko A. G. *Ekologicheskij potencial landshafta* [Ecological potential of the landscape]. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva (VGO) = Proc. of the All-Union Geographical Society (AGS)*, 1991, vol. 4, pp. 305–316. (in Russian)
5. Prozorov L. L. *Enciklopedicheskij slovar'. Geoekologiya* [An encyclopedic dictionary. Geoecology]. Moscow, 2004, 393 p. (in Russian)

6. Brilevskij M. N., Gagina N. V., Morozov E. V. *Geoekologicheskaya ocenka prirodoohrannogo potenciala fiziko-geograficheskikh regionov Belarusi* [Geoeological assessment of the environmental potential of the physical and geographical regions of Belarus]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Belarusian State University*, 2009, vol. 2, pp. 88–93. (in Russian)
7. Vladimirov I. N. *Ekologicheskij potencial geosistem Bajkal'skoj Sibiri* [Ecological potential of geosystems of Baikal Siberia]. Irkutsk, 2020, 44 p. (in Russian)
8. Tokarchuk C. M. *Geoekologicheskaya ocenka prirodoohrannogo potenciala administrativnykh rajonov Belarusi (kak odin iz metodov ocenki reprezentativnosti seti OOPT)* [Geoeological assessment of the environmental protection potential of the administrative regions of Belarus (as one of the methods for assessing the representativeness of the network of protected areas)]. *Pskovskij regionologicheskij zhurnal. Priroda i ekologiya = Pskov Regionological Journal. Nature and ecology*. Pskov, 2016, vol. 3 (27), pp. 31–45. (in Russian)
9. Marcinkevich G. I. *Gradostroitel'stvo i arhitektura: sovremennost' i perspektivy* [Urban planning and architecture: modernity and prospects]. Minsk, 1998, 51 p. (in Russian)
10. Muhina L. I. *Principy i metody tekhnologicheskoy ocenki prirodnykh kompleksov* [Principles and methods of technological assessment of natural complexes]. Moscow, 1973, 164 p. (in Russian)
11. *Faktory i mekhanizmy ustojchivosti geosistem* [Factors and mechanisms of geosystem stability]. Moscow, 1989, 329 p. (in Russian)
12. Pavlovskij A. I. *Inzhenerno-geomorfologicheskaya ocenka ekzogennoj dinamiki rel'efa Belarusi* [Engineering and geomorphological assessment of the exogenous dynamics of the relief of Belarus]. *Vestnik Brestskago universiteta = Bulletin of the Brest University*, 2022, vol. 2, pp. 72–84. (in Russian)
13. *Metodicheskie rekomendacii po uchetu stroeniya i ustojchivosti landshaftov pri reshenii zadach razmeshcheniya narodnohozyajstvennykh ob'ektov v sostave regional'nykh planov* [Methodological recommendations on taking into account the structure and stability of landscapes when solving the tasks of placing national economic facilities as part of regional plans]. Minsk, 1998, 73 p. (in Russian)
14. Kasimov N. S. *Ekogeohimiya landshaftov* [Ecogeochemistry of landscapes]. Moscow, 2013, 207 p. (in Russian)
15. Struk M. I., Bakarasov V. A. *Metodika ocenki ustojchivosti k vneshnim vozdeystviyam prirodnoj sredy administrativnykh rajonov Belarusi* [Methodology for assessing the environmental resistance of the administrative regions of Belarus]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Belarusian State University*, 2003, vol. 1, pp. 64–69. (in Russian)
16. Khomich V. S., Kakareka S. V., Kukharchik T. I. *Ekogeohimiya gorodskih landshaftov Belarusi* [Ecogeochemistry of urban landscapes of Belarus]. Minsk, 2004, 259 p. (in Russian)
17. Ryzhikov V. A., Romankevich Yu. A., Savchenko S. V., Zayn' El'-Din' R. *Ranzhirovanie gorodov Belarusi po ustojchivosti pochv k tekhnogennym himicheskim nagruzkam* [Ranking of cities in Belarus by soil resistance to man-made chemical loads]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, Minsk, 2019, pp. 15–22. (in Russian)
18. Gubin V. N., Fadeeva M. V., Volkov V. E. *Metodika srednemasshtabnogo ekologo-geograficheskogo kartografirovaniya* [The methodology of medium-scale ecological and geographical mapping]. Minsk, 1994, 28 p. (in Russian)
19. Brilevskij M. N. *Prirodoohrannyj potencial fiziko-geograficheskikh rajonov Belarusi i ego znachenie dlya nacional'noj ekologicheskoy seti* [The environmental potential of the physical and geographical regions of Belarus and its importance for the national ecological network]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya = Journal of the Belarusian State University. Geography. Geology*, 2023, vol. 2, pp. 17–30. (in Russian)
20. Rybarski I., Gajsse E. *Vliyanie sostava ugodij na ekologicheskuyu stabil'nost' territorii* [The influence of land composition on the ecological stability of the territory]. *Zemleustroitel'nye raboty v specificheskikh usloviyah = Land management work in specific conditions*, Tatranska Lomnica, 1988, pp. 19–26. (in Russian)
21. *Gosudarstvennyj kadastr atmosfernogo vozduha. Informatsionnyi byulleten' 2020 goda* [State Cadaster of atmospheric air]. Minsk, 2021, 34 p. (in Russian)

Информация об авторе

Романкевич Юлия Александровна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yulia_romankevich@mail.ru

Information about the author

Julia A. Ramankevich – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yulia_romankevich@mail.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-73-84>
УДК 628.381.1

Поступила в редакцию 31.03.2025
Received 31.03.2025

ЗАГРЯЗНЯЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ ОСАДКОВ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД (НА ПРИМЕРЕ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ)

Е. Н. Басалай, В. С. Хомич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. По результатам исследований содержания тяжелых металлов (ТМ) в осадках городских сточных вод (ОГСВ) очистных сооружений девяти городов Брестской области оценен их загрязняющий потенциал для местных почв с использованием коэффициента концентрации (K_c – по отношению к местному фону) и коэффициента опасности (K_o – по отношению к гигиеническим нормативам).

Показана высокая степень обогащения ОГСВ по сравнению с региональным фоном цинком – в 36,0–717,1 раза, медью – в 32,1–567,6, никелем – в 4,8–138,6, хромом – в 2,0–147,6, что свидетельствует о высоком загрязняющем потенциале ОГСВ исследованных городов. Представлены ранжированные ряды средних коэффициентов концентрации ТМ в ОГСВ по отношению к субрегиональному фону и коэффициентов опасности ТМ в составе ОГСВ для девяти рассматриваемых городов. Показано, что в малых городах загрязняющий потенциал ОГСВ в наибольшей степени обеспечивается за счет цинка (49–56 %) и в меньшей степени – за счет меди (26–38 %). В средних городах вклад цинка в загрязняющий потенциал ОГСВ снижается и возрастает доля меди. В Бресте, относящемся к крупным городам, загрязняющий потенциал ОГСВ связан главным образом с цинком (42 %) и медью (32 %), в меньшей степени – с никелем (12 %) и хромом (8 %).

Ключевые слова: осадки городских сточных вод; тяжелые металлы; коэффициент концентрации; коэффициент опасности; реализация загрязняющего потенциала.

Для цитирования. Басалай Е. Н., Хомич В. С. Загрязняющий потенциал осадков городских сточных вод (на примере Брестской области) // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 73–84.

POLLUTING POTENTIAL OF URBAN WASTEWATER SLUDGE (ON THE EXAMPLE OF BREST REGION)

E. N. Basalai, V. S. Khomich

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

Abstract. Based on the research results of heavy metals (HM) content in urban wastewater sludge (UWWS) of treatment facilities in nine cities of the Brest region, their polluting potential for local soils was assessed using the concentration coefficient (K_c in relation to the local background) and the hazard coefficient (K_o in relation to hygienic standards).

Compared to the regional background, a high degree of enrichment in zinc is shown – 36.0–717.1 times, copper – 32.1–567.6, nickel – 4.8–138.6, chromium – 2.0–147.6, which indicates high polluting potential of the studied cities. The ranked series of the average concentration coefficients of HM in the UWWS in relation to the sub-regional background and the hazard coefficients of HM in the UWWS for 9 cities under consideration are presented. It has been shown that in small towns, the polluting potential of UWWS is provided to the greatest extent of zinc (49–56 %) and to a lesser extent by copper (26–38 %). In medium-sized cities, the contribution of zinc to the polluting potential of the UWWS is decreasing and the proportion of copper is increasing. In Brest, which is one of the major cities, the polluting potential of UWWS is mainly associated with zinc (42 %) and copper (32 %), to a lesser extent with nickel (12 %) and chromium (8 %).

Keywords: urban wastewater sludge; heavy metals; concentration coefficient; hazard coefficient; realization of the polluting potential.

For citation. Basalai E. N., Khomich V. S. Polluting potential of urban wastewater sludge (on the example of Brest region). *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 73–84.

Введение. Очистные сооружения являются важнейшим компонентом городов, осуществляющим аккумуляцию и очистку сточных вод, которые поступают от населения и промышленных предприятий. Побочным продуктом очистки сточных вод являются осадки городских сточных вод (ОГСВ), которые представлены твердой фракцией, состоящей из минеральных и органических веществ, выделенных из сточных вод в процессе их очистки методом отстаивания (сырой осадок), и комплекса микроорганизмов, участвовавших в процессе биологической очистки сточных вод и выведенных из технологического процесса (избыточный активный ил). ОГСВ специфичны по составу, условиям образования и обработки, что напрямую зависит от специализации городов и наличия в них промышленных предприятий, качества поступающих на очистку сточных вод, способов обработки сточных вод и ОГСВ, и отражает особенности функционирования конкретного населенного пункта [1, 2].

Преобладающая часть ОГСВ в Беларуси, в том числе в Брестской области (за исключением Бреста, Барановичей и Столина), размещается на иловых площадках для обезвоживания и подсушивания. При отсутствии альтернативы иловые площадки становятся объектами длительного хранения данного вида отходов. Накапливаясь в больших объемах на открытых иловых картах на территории очистных сооружений, ОГСВ формируют крупные ореолы загрязнения прилегающих территорий: они служат стабильными источниками органических, минеральных и биологических загрязнений природных компонентов [2, 3]. Наиболее значимыми являются химические и биологические факторы, определяющие специфику и общий уровень антропогенного воздействия [2]. В составе ОГСВ содержится большое количество органического вещества и воды, поэтому они быстро загнивают, что сопровождается образованием и эмиссией сероводорода, углекислого газа и метана и оказывает негативное воздействие на атмосферный воздух. При непринятии мер по использованию ОГСВ иловые площадки превращаются в объекты накопленного экологического вреда [4]. Выбор эффективного способа подготовки (обработки) ОГСВ позволяет существенно снизить степень опасности данных отходов и расширить возможности для их дальнейшего использования [5].

Цель работы – оценить загрязняющий потенциал ОГСВ для почв в отношении тяжелых металлов (ТМ) и степень его реализации в зонах воздействия городских очистных сооружений в Брестской области.

Методика и объекты исследований. В качестве объектов исследований выбрали очистные сооружения девяти городов Брестской области разной величины: крупного города (Брест), четырех средних (Берёза, Лунинец, Ивацевичи, Кобрин) и четырех малых (Пружаны, Малорита, Каменец, Ганцевичи).

Отбор проб ОГСВ проводили в соответствии с РД РБ 0212.6-2002 [6], ГОСТ Р 56226-2014 [7] и СТБ CEN/TR 15310-1-2018 [8]. Пробы, отобранные для химического анализа, упаковывали и транспортировали в герметичных емкостях из химически нейтрального материала.

Содержание в ОГСВ валовых форм ТМ (цинка, меди, кадмия, кобальта, никеля, свинца, хрома и марганца) определяли на атомно-абсорбционном спектрометре Solaar MkII M6 Double AAS в соответствии с СТБ ИСО 11047-2006 [9] и атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой iCAP 7200 Thermo Scientific в соответствии с ГОСТ 30538-97 [10]. Необходимо отметить, что цинк, медь, марганец и кобальт являются важными для жизни растений почвенными микроэлементами [11], однако токсичны при превышении их пороговых концентраций, при которых они становятся вредными для растительности.

Загрязняющий потенциал ОГСВ оценивали по содержанию ТМ в их составе с учетом субрегиональных особенностей территории с использованием коэффициента концентрации элемента (K_c) по [11] и гигиенических нормативов ПДК (для валовых форм свинца и марганца) / ОДК (для валовых форм хрома и кобальта; для валовых форм цинка, никеля, кадмия и меди в песчаных и супесчаных почвах) с применением коэффициента опасности элемента (K_o) по [12]. Коэффициент концентрации элемента (K_c), характеризующий загрязняющий потенциал ОГСВ, определяли как отношение реального валового его содержания в ОГСВ ($C_{огсв}$) к среднему содержанию элемента в почвах пахотных земель Брестской области ($C_{ср.}$). Коэффициент опасности элемента, содержащегося в ОГСВ (K_o), определяли как отношение реального валового его содержания в ОГСВ ($C_{огсв}$) к величине действующего гигиенического норматива ПДК/ОДК для валовых форм элемента в почве ($C_{пдк}$).

Для сравнительных оценок загрязняющего потенциала ОГСВ предложена его градация с выделением следующих ступеней: <10 – незначительный загрязняющий потенциал, 10–50 – низкий, 50–100 – средний, 100–200 – высокий, >200 – очень высокий загрязняющий потенциал.

Степень реализации загрязняющего потенциала отдельных ТМ в составе ОГСВ для почв в зонах воздействия очистных сооружений

$$П_{\text{реал.}} = \frac{K_c \cdot 100}{П_3},$$

где $П_{\text{реал.}}$ – реализованный потенциал загрязнения, %; K_c – коэффициент концентрации элемента в почве в зоне воздействия рассматриваемого очистного сооружения относительно фона; $П_3$ – загрязняющий потенциал элемента в составе ОГСВ.

Результаты и их обсуждение. В Республике Беларусь ОГСВ не являются объектами аналитического контроля, не выделяются в качестве отдельного объекта нормативно-правового регулирования и относятся к отходам [1].

В этой связи обращение с ОГСВ регламентируется правовыми актами, устанавливающими порядок обращения с отходами, например, Законом Республики Беларусь «Об обращении с отходами» [13], и рядом общих для всех отходов нормативных правовых актов и технических нормативных правовых актов, например, постановлением Совета Министров Республики Беларусь «О порядке обращения с отходами» [14].

Учет ОГСВ в Беларуси ведется с использованием общегосударственного классификатора [15], который устанавливает коды, наименования и классы опасности отходов (табл. 1).

Таблица 1. Классификация осадков городских сточных вод согласно действующему на начало 2025 г. общегосударственному классификатору отходов в Республике Беларусь* [15]

Table 1. Classification of urban wastewater sludge according to the national waste classifier in the Republic of Belarus effective at the beginning of 2025* [15]

Код отхода	Наименование	Класс опасности
8430100	Отбросы с решеток	3
8430200	Осадки сооружений биологической очистки хозяйственно-фекальных сточных вод	3
8430300	Ил активный очистных сооружений	4
8430400	Осадок сухой (подвергнутый термической или иной сушке)	3
8430500	Песок из песколовков (минеральный осадок)	4
8430600	Осадки сетей хозяйственно-фекальной канализации	4
8430700	Осадки очистки химзагрязненных сточных вод на очистных сооружениях	–
8430800	Осадки биологических прудов очистных сооружений	–
8439900	Прочие осадки очистки сточных вод на очистных сооружениях, не вошедшие в группу 3	–

*В течение 2025 г. планируется утверждение данного классификатора в новой редакции.

Хранение и захоронение ОГСВ регулируется Законом Республики Беларусь «Об обращении с отходами» [13], статья 26 которого свидетельствует о наличии двух видов хранения отходов: временного хранения (в Брестской области именно иловые площадки становятся объектами длительного временного хранения ОГСВ) и хранения отходов на санкционированных местах хранения с обязательной их регистрацией в соответствии с [14]. Захоронение ОГСВ в соответствии с [13] осуществляется на полигонах твердых коммунальных отходов.

Ведение реестра объектов хранения и захоронения отходов, а также регистрацию объектов хранения отходов осуществляет РУП «Бел НИЦ «Экология». В реестре объектов хранения и захоронения отходов Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь по состоянию на февраль 2025 г. [16] зарегистрировано 92 объекта хранения ОГСВ и 142 объекта хранения осадков сточных вод в целом, на которых по состоянию на начало 2024 г. накоплено 14,8 млн т данного вида отходов (рис. 1).

В течение 2023 г. в Республике Беларусь образовалось 2118,47 тыс. т осадков сточных вод [17] (238,34 кг/год на 1 человека) при 496,38 тыс. т в 1991 г. (48,72 кг/год на 1 человека) [18]. В течение тридцатилетнего периода количество ежегодно образующихся осадков сточных вод на очистных сооружениях в Беларуси увеличилось более чем в 4 раза, а количество образовавшегося осадка в пересчете на 1 человека с учетом численности населения увеличилось почти в 5 раз.

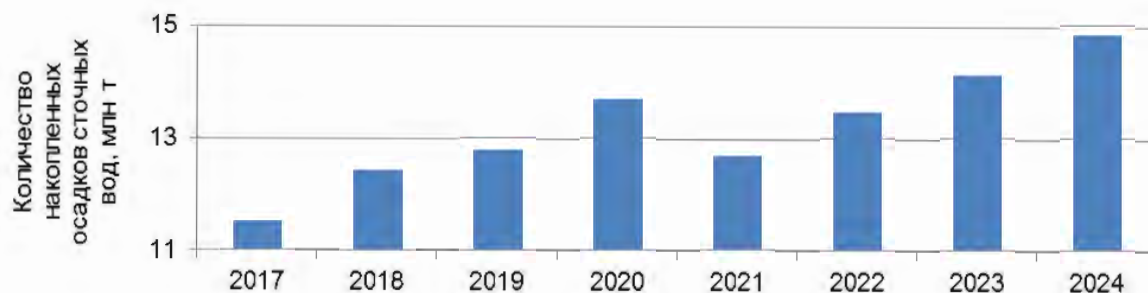


Рис. 1. Количество накопленных осадков сточных вод в Беларуси в период 2017–2024 гг. (на начало года), млн т [17]

Fig. 1. The amount of accumulated sewage sludge in Belarus in the period 2017–2024 (at the beginning of the year), million tons [17]

В качестве объектов хранения ОГСВ в реестре представлены [16]: иловые площадки, иловые пруды, иловые карты, шламоотвалы для сбора и хранения осадков, шламоотвалы осадков, площадки-накопители для обезвоженного осадка, площадки для хранения активного ила, илонакопители, песковые площадки, отстойники осадка биологических прудов, площадки для хранения осадка, поля фильтрации и очистные сооружения, на территории которых хранятся осадки, карты полей фильтрации, полигоны для хранения осадков сточных вод, иловые земляные отстойники, сборники осадка очистных сооружений, накопители временного хранения осадков, шламовые площадки и др.

В целом в Беларуси по состоянию на февраль 2025 г. объекты хранения ОГСВ (от всех объектов хранения осадков сточных вод) составляют от 25,0 % (Гомельская область – 3 зарегистрированных объекта хранения ОГСВ в соответствии с реестром) до 80,0 % (Могилёвская область – 8 зарегистрированных объектов хранения ОГСВ). В Брестской области количество объектов хранения ОГСВ в 2025 г. по сравнению с 2021 г. значительно снизилось [16]: осадков сточных вод – в целом на 89,5 % и ОГСВ – на 93,1 % (рис. 2).

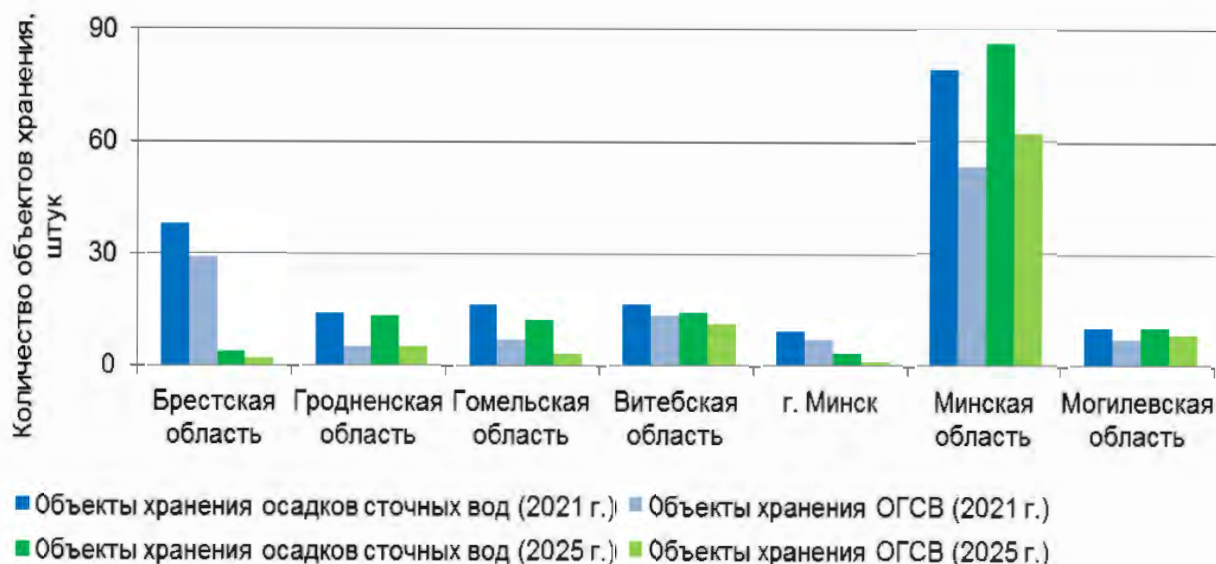


Рис. 2. Количество объектов хранения осадков сточных вод, в том числе осадков городских сточных вод, на территории административных областей и г. Минска по состоянию на 2021 и 2025 г. (составлено по данным [16])

Fig. 2. The number of wastewater sludge storage facilities, including urban wastewater sludge, in the administrative regions and the city of Minsk as of 2021 and 2025 (compiled according to [16])

Отсутствие в большинстве случаев сооружений для защиты подземных вод (противофильтрационных экранов, водонепроницаемого основания и т. п.) обуславливает вероятность негативного влияния объектов хранения ОГСВ на окружающую среду.

Результаты авторского исследования содержания ТМ в ОГСВ девяти городов Брестской области [2] свидетельствуют о том, что оно колеблется в широких пределах и составляет для цинка 455,7–9070,8 мг/кг, марганца – 93,8–605,8, меди – 80,9–1430,4, хрома – 11,2–819,3, свинца – 15,5–57,9, никеля – 8,6–249,4, кобальта – ниже предела обнаружения – 7,3 и кадмия – 0,6–1,8 мг/кг.

Рассчитанные коэффициенты концентрации (K_c) по отношению к субрегиональному фону для пахотных почв по [11] свидетельствуют о том, что средние концентрации цинка в ОГСВ рассматриваемых девяти городов выше фоновое значения в 36,0–717,1 раза, меди – в 32,1–567,6, никеля – в 4,8–138,6, хрома – в 2,0–147,6, кадмия – в 3,3–10,1, свинца – в 2,6–9,7 раза. Максимальные коэффициенты концентрации кобальта и марганца не превышают 6,6 (Берёза) и 5,3 (Ганцевичи) соответственно, в других городах они близки или ниже 1.

Ранжированные ряды средних коэффициентов концентрации ТМ (K_c) по отношению к субрегиональному фону для девяти рассматриваемых городов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Ранжированные ряды тяжелых металлов по загрязняющему потенциалу в составе осадков городских сточных вод городов Брестской области

Table 2. Ranked ranks of heavy metals by polluting potential in the sediment of urban wastewater sludge from cities of the Brest region

Город		ТМ и их загрязняющий потенциал	Суммарный загрязняющий потенциал*
по величине	ОГСВ		
Крупный	Брест	Zn (70,4) > Cu (52,1) > Ni (20,3) > Cr (11,7) > Cd (5,2) > Pb (4,2) > Co (2,3) > Mn (0,95)	167,9
Средний	Кобрин	Cr (147,6) > Zn (130,5) > Cu (71,9) > Cd (6,4) > Ni (6,3) > Mn (4,6) > Pb (3,7) > Co (2,4)	373,0
	Берёза	Zn (82,7) > Cu (35,0) > Cr (9,9) > Pb (8,4) > Co (6,6) > Ni (5,1) > Cd (4,4) > Mn (1,5)	153,2
	Лунинец	Cu (88,2) > Zn (36,0) > Cd (10,1) > Pb (7,4) > Ni (5,7) > Cr (2,1) > Mn (1,3) > Co (1,1)	151,8
	Ивацевичи	Cu (138,9) > Zn (71,1) > Ni (4,8) > Cd (4,0) > Cr (3,8) > Mn (3,3) > Pb (3,1)	228,9
Малый	Пружаны	Zn (717,1) > Cu (567,6) > Ni (138,6) > Cr (35,1) > Pb (9,7) > Cd (8,2) > Mn (4,5)	1480,6
	Ганцевичи	Zn (83,7) > Cu (39,8) > Ni (6,6) > Mn (5,3) > Cd (5,2) > Co (4,6) > Pb (3,4) > Cr (2,1)	150,6
	Малорита	Zn (60,9) > Cu (32,1) > Ni (5,1) > Cd (4,9) > Pb (3,0) > Cr (2,0) > Mn (0,81)	108,1
	Каменец	Zn (58,0) > Cu (44,0) > Ni (5,6) > Cd (3,3) > Cr (2,8) > Pb (2,6) > Mn (1,5) > Co (0,56)	117,8
Средний загрязняющий потенциал ОГСВ**		Zn (145,5) > Cu (118,8) > Cr (24,3) > Ni (22,0) > Cd (5,8) > Pb (5,0) > Mn (2,6) > Co (2,0)	

*Для значений $K_c > 1$.

**Средний загрязняющий потенциал ОГСВ для девяти рассматриваемых городов.

Примечание. Полужирным шрифтом выделены значения $K_c > 1$, светлым курсивом – $K_c < 1$.

Очень высокий загрязняющий потенциал характерен для ОГСВ Пружан (по цинку и меди), высокий – для ОГСВ Кобрин (по меди и цинку), Ивацевичей (по меди) и Пружан (по никелю). Средний уровень потенциала характерен для Бреста (по цинку и меди), Лунинца и Кобрин (по меди), Берёзы, Ивацевичей, Ганцевичей, Малориты и Каменца (по цинку).

Суммарный загрязняющий потенциал ОГСВ в рассматриваемых городах изменяется в широких пределах – от 108,1 в Малорите до 1480,6 в Пружанах. На рис. 3 отражена доля конкретных ТМ в общем загрязняющем потенциале ОГСВ городов Брестской области. Как следует из круговых диаграмм, в малых городах загрязняющий потенциал ОГСВ в наибольшей степени обеспечивается за счет цинка (49–56 %) и в меньшей степени – за счет меди (26–38 %). В сумме их вклад составляет 82–87 %.

В средних городах вклад цинка в загрязняющий потенциал ОГСВ несколько ниже, за исключением Берёзы (56 %). В Ивацевичах и Лунинце загрязняющий потенциал в наибольшей степени обеспечивается за счет меди (61 и 58 % соответственно), в Кобрине – за счет хрома (39 %) и цинка (35 %). В Бресте, относящемся к крупным городам, загрязняющий потенциал ОГСВ связан главным образом с цинком (42 %) и медью (32 %), в меньшей степени – с никелем (12 %) и хромом (8 %).

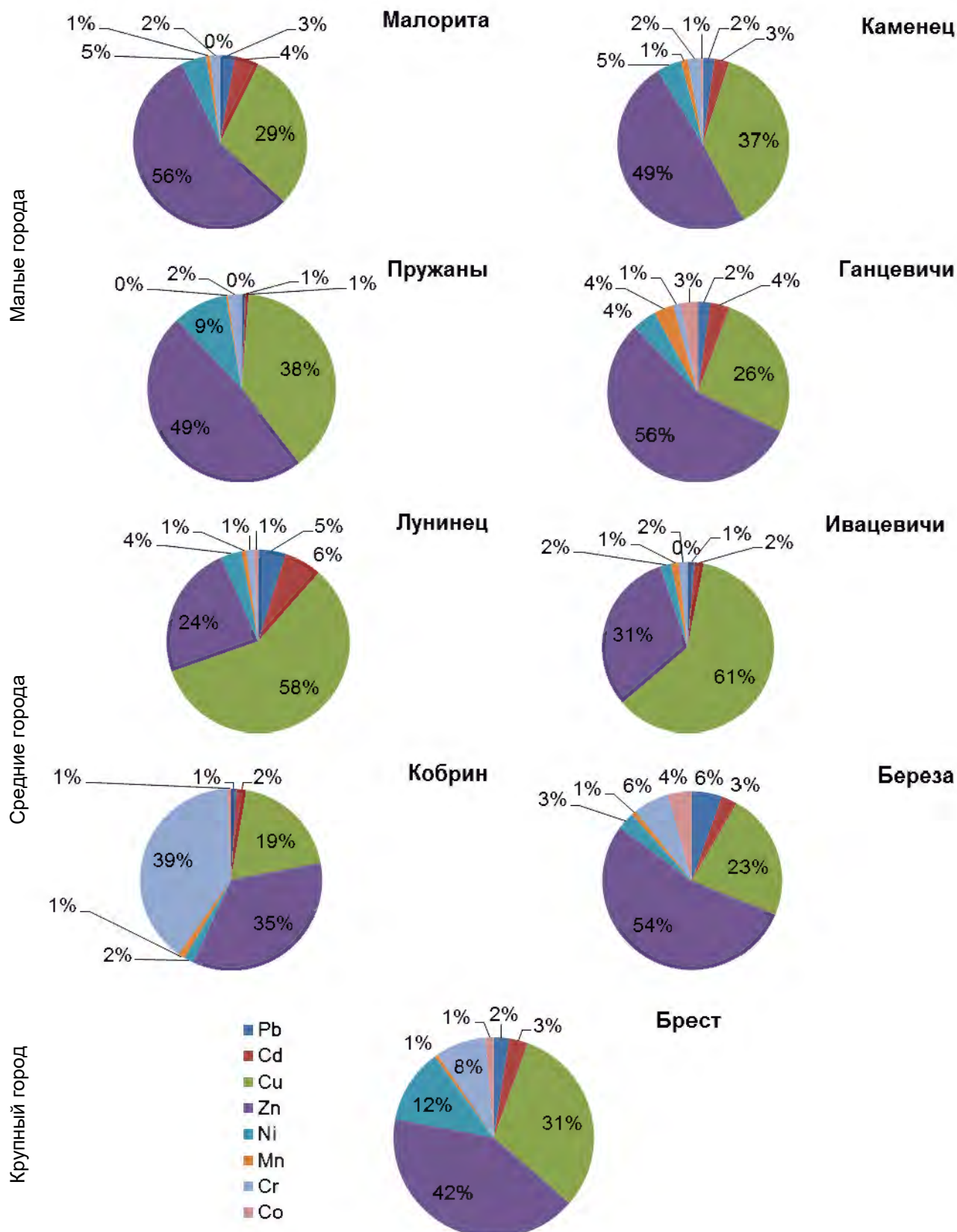


Рис. 3. Доля тяжелых металлов в общем загрязняющем потенциале осадков городских сточных вод городов Брестской области, %

Fig. 3. The share of heavy metals in the total polluting potential of urban wastewater sludge in the cities of the Brest region, %

Результаты расчета коэффициентов опасности (K_o) ОГСВ по сравнению с действующими гигиеническими нормативами для почв [12] позволили построить ранжированные геохимические ряды коэффициентов опасности ОГСВ городов Брестской области по содержанию ТМ (табл. 3). Анализ геохимических рядов коэффициентов опасности ОГСВ показывает, что практически все ряды возглавляются цинком и медью, исключение составляет Кобрин, где коэффициент опасности хрома в ОГСВ выше, чем меди. Наибольший суммарный коэффициент опасности характерен для ОГСВ Пружан, наименьший – для Каменца и Малориты.

Таблица 3. Геохимические ряды коэффициентов опасности осадков городских сточных вод по показателю отношения концентраций тяжелых металлов в их составе к ПДК/ОДК для почв по [12]

Table 3. Geochemical series of hazard coefficients for precipitation of urban wastewater sludge in terms of the ratio of concentrations of heavy metals in their composition to the MPC /APC for soils according to [12]

Город		Геохимический ряд коэффициентов опасности*	Суммарный коэффициент опасности**
по величине	ОГСВ		
Крупный	Брест	Zn (16,1) > Cu (4,0) > Cd (1,9) > Ni (1,8) > Pb (0,8) = Cr (0,8) > Mn (0,1)	23,8
Средний	Кобрин	Zn (29,9) > Cr (8,2) > Cu (5,5) > Cd (2,3) > Pb (0,7) > Ni (0,6) > Cr (0,5) > Mn (0,4)	45,9
	Берёза	Zn (19,0) > Cu (2,7) > Cd (1,6) = Pb (1,6) > Ni (0,4) > Mn (0,1)	24,8
	Лунинец	Zn (8,3) > Cu (6,7) > Cd (3,7) > Pb (1,4) > Ni (0,5) > Cr (0,1) = Mn (0,1)	20,0
	Ивацевичи	Zn (16,5) > Cu (10,6) > Cd (1,4) > Pb (0,6) > Ni (0,4) > Mn (0,3) > Cr (0,2)	28,4
Малый	Пружаны	Zn (164,9) > Cu (43,3) > Ni (12,5) > Cd (2,9) > Cr (1,9) > Pb (1,8)	227,4
	Ганцевичи	Zn (19,2) > Cu (2,0) > Cd (1,9) > Pb (0,6) = Ni (0,6) > Mn (0,4) > Cr (0,1)	24,2
	Малорита	Zn (14,0) > Cu (2,5) > Cd (1,8) > Pb (0,6) > Ni (0,5) > Cr (0,1) = Mn (0,1)	18,2
	Каменец	Zn (13,3) > Cu (3,4) > Cd (1,2) > Pb (0,5) = Ni (0,5) > Cr (0,2) > Mn (0,1)	17,9
Среднее значение для ОГСВ Брестской области		Zn (33,4) > Cu (9,1) > Cd (2,1) > Ni (2,0) > Cr (1,4) > Pb (0,9) > Mn (0,2)	

*В скобках указаны величины коэффициентов опасности (K_o).

**Для значений $K_o > 1$.

Примечание. Обозначения те же, что и в табл. 2.

Для большинства рассматриваемых городов потенциал опасности ОГСВ обусловлен главным образом содержанием цинка в их составе. Как следует из рис. 4, практически во всех городах, за исключением Лунинца, вклад цинка в формирование потенциала опасности составляет больше половины (от 55 до 74 %). В ОГСВ Ивацевичей и Лунинца высок также вклад меди в формирование потенциала опасности – 35 и 32 % соответственно.

Расчеты показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ в зонах воздействия очистных сооружений Кобрин, Берёзы и Малориты (на промплощадках и в близких зонах воздействий – до 300 м) [19] показали широкий диапазон их значений, что обусловлено как значительными различиями в содержании ТМ в ОГСВ, формами нахождения и подвижностью химических элементов, так и местными ландшафтно-геохимическими условиями (табл. 4).

Наименьшие значения показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ характерны для цинка (2–4 %) и меди (3–13 %). Средние значения реализации загрязняющего потенциала – для никеля (от 37 до 52 %), а также для свинца в зонах воздействия очистных сооружений Кобрин и Малориты (30 и 37 % соответственно), несколько ниже данный показатель в Берёзе – 14 %.

Наибольшие значения показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ, превышающие 100 %, характерны для марганца в зонах воздействия очистных сооружений Берёзы и Малориты (162 и 427 %), что обусловлено природными источниками аномального содержания марганца в почвах полесских ландшафтов [20].

Низкие значения показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ, прежде всего по цинку и меди, при высоком загрязняющем потенциале ОГСВ по данным химическим элементам, позволяют сделать вывод об ожидаемой тенденции дальнейшего накопления меди и цинка в почвах в зонах воздействия городских очистных сооружений.

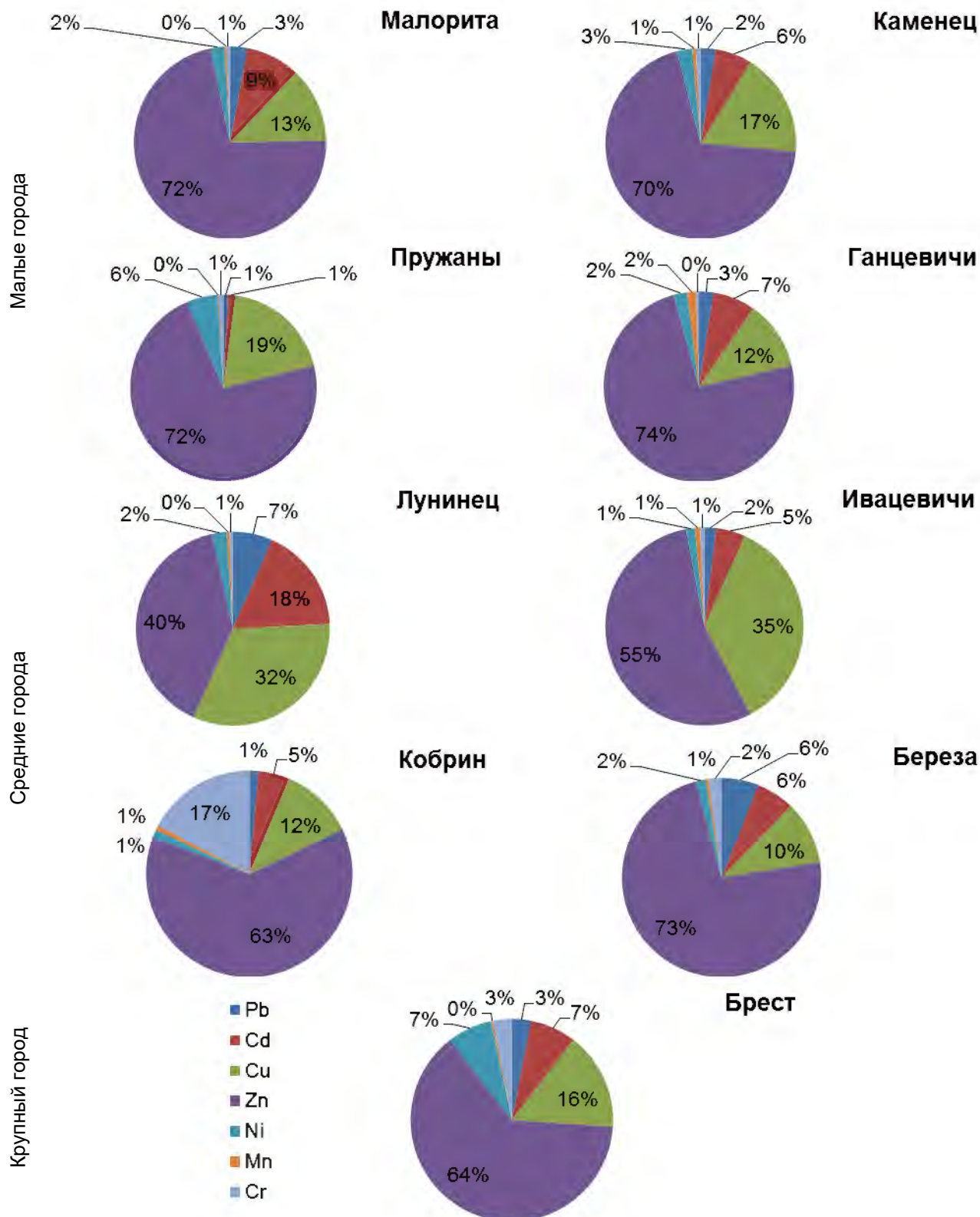


Рис. 4. Доля тяжелых металлов в потенциальной опасности загрязнения почв осадками городских сточных вод с превышениями гигиенических нормативов

Fig. 4. The share of heavy metals in the potential danger of soil contamination by precipitation of UWWS exceeding hygienic standards

Таблица 4. Оценка реализации загрязняющего потенциала осадков городских сточных вод в зонах воздействия очистных сооружений некоторых городов Брестской области**Table 4. Assessment of the implementation of the UWWs polluting potential in the impact zones of wastewater treatment plants in some cities of the Brest region**

Город	Показатель	Pb	Cu	Zn	Ni	Mn	Cr
Кобрин	П _з	3,7	71,9	130,5	6,3	4,6	147,6
	Пр _{реал. ср.} , %	30	3	2	52	47	3
	Пр _{реал. max} , %	54	9	3	192	110	13
Берёза	П _з	8,4	35,0	82,7	5,1	1,5	9,9
	Пр _{реал. ср.} , %	14	9	3	37	162	30
	Пр _{реал. max} , %	29	23	20	100	288	162
Малорита	П _з	3,0	32,1	60,9	5,1	0,81	2,0
	Пр _{реал. ср.} , %	37	13	4	46	427	–
	Пр _{реал. max} , %	55	25	15	80	1112	–

Необходимо отметить, что в пунктах наблюдений с максимальными зафиксированными концентрациями ТМ в почвах показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ в 1,5–6,6 раза выше рассчитанного для средних концентраций, что свидетельствует о потенциале дальнейшего накопления загрязняющих веществ в почвах.

При этом наибольшие риски связаны с накоплением в почвах цинка, максимальные концентрации которого в ряде случаев превышают гигиенические нормативы.

Закключение. В Беларуси на начало 2024 г. накоплено 14,8 млн т осадков сточных вод, которые согласно реестру объектов хранения и захоронения отходов Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь хранятся на 142 объектах хранения осадков сточных вод, среди которых 92 объекта используются для хранения ОГСВ.

Выполненные исследования содержания ТМ в ОГСВ и рассчитанные коэффициенты концентрации (К_с) показали высокую степень обогащения ОГСВ ТМ по сравнению с региональным фоном. Средние концентрации цинка в ОГСВ рассматриваемых девяти городов выше фонового значения в 36,0–717,1 раза, меди – в 32,1–567,6, никеля – в 4,8–138,6, хрома – в 2,0–147,6, кадмия – в 3,3–10,1, свинца – в 2,6–9,7 раза, что свидетельствует о высоком загрязняющем потенциале ОГСВ исследованных городов. Ранжированный ряд средних коэффициентов концентрации ТМ (К_с) по отношению к субрегиональному фону для девяти рассматриваемых городов: Zn (145,5) > Cu (118,8) > Cr (24,3) > Ni (22,0) > Cd (5,8) > Pb (5,0) > Mn (2,6) > Co (2,0).

Наиболее высокий загрязняющий потенциал характерен для ОГСВ Пружан (по цинку и меди), высокий – для ОГСВ Кобрин (по меди и цинку), Ивацевичей (по меди) и Пружан (по никелю). Средний уровень потенциала характерен для Бреста (по цинку и меди), Лунинца и Кобрин (по меди), Берёзы, Ивацевичей, Ганцевичей, Малориты и Каменца (по цинку).

Суммарный загрязняющий потенциал ОГСВ в рассматриваемых городах изменяется в широких пределах – от 108,1 в Малорите до 1480,6 в Пружанах. В малых городах загрязняющий потенциал ОГСВ в наибольшей степени обеспечивается за счет цинка (49–56 %) и в меньшей степени – за счет меди (26–38 %). В сумме их вклад составляет 82–87 %. В средних городах вклад цинка в загрязняющий потенциал ОГСВ несколько ниже, за исключением Берёзы (56 %). В Ивацевичах и Лунинце загрязняющий потенциал в наибольшей степени обеспечивается за счет меди (61 и 58 % соответственно), в Кобрине – за счет хрома (39 %) и цинка (35 %). В Бресте, относящемся к крупным городам, загрязняющий потенциал ОГСВ связан главным образом с цинком (42 %) и медью (32 %), в меньшей степени – с никелем (12 %) и хромом (8 %).

Расчеты показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ в зонах воздействия очистных сооружений Кобрин, Берёзы и Малориты показали широкий диапазон их значений: от 2–4 % для цинка и 3–13 % для меди – до 100 % и более для марганца.

Низкие значения показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ, прежде всего по цинку и меди, при высоком загрязняющем потенциале ОГСВ по данным химическим элементам позволяют сделать вывод об ожидаемой тенденции дальнейшего накопления меди и цинка в почвах в зонах воздействия городских очистных сооружений.

Благодарность. Авторы выражают благодарность научному сотруднику лаборатории биогеохимии Полесского аграрно-экологического института НАН Беларуси М. М. Дашкевичу за помощь в определении содержания ТМ в ОГСВ.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to M. M. Dashkevich, research associate of the Laboratory of Biogeochemistry of Polesky Agrarian and Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus M. Dashkevich for his help in determining the content of ТМ in OGSV.

Список использованных источников

1. Янин, Е. П. Источники и пути поступления загрязняющих веществ в реки промышленно-урбанизированных регионов / Е. П. Янин // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – М., 2002. – № 6. – С. 2–56.
2. Басалай, Е. Н. Геоэкологическая оценка пригодности осадков городских сточных вод для различных видов использования (на примере Брестской области) / Е. Н. Басалай // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 93–117.
3. Лихачева, А. В. Оценка воздействия иловых площадок на окружающую среду в системе обращения с избыточным активным илом / А. В. Лихачева, В. Н. Марцуль // Новые технологии рециклинга вторичных ресурсов : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24–26 окт. 2001 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2001. – С. 159–164.
4. Дрегуло, А. М. Трансформация иловых карт в объекты накопленного экологического ущерба: риски, факторы, техногенез / А. М. Дрегуло. – М. : Библио-Глобус, 2019. – 270 с.
5. Вага, И. И. Анализ отечественных технологий и передовых мировых практик подготовки осадков производственных сточных вод / И. И. Вага, А. И. Чухольский, А. А. Кравченко, М. Ю. Семашко // Природнае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця : зб. навук. прац VIII Міжнар. навук. канф. «Прыроднае асяроддзе Палесся і навукова-практычныя аспекты рацыянальнага рэсурсакарыстання», Брэст, 14–16 верас. 2022 г. / НАН Беларусі, Палескі агр.-экалаг. ін-т ; рэдкал. М. В. Міхальчук (гал. рэд.) [і інш.]. – Брэст : Альтэрнатыва, 2022. – Вып. 14. – С. 152–156.
6. Об утверждении РД РБ «Методика отбора проб отходов» (РД РБ 0212.6-2002) : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 8 янв. 2003 г. № 3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2003. – 9 с.
7. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Методы отбора и подготовки проб : ГОСТ Р 56226-2014. – М. : Стандартинформ, 2019. – 13 с.
8. Охрана окружающей среды и природопользование. Аналитический (лабораторный) контроль и мониторинг окружающей среды. Характеристика отходов. Отбор проб отходов. Ч 1. Руководство по выбору и применению критериев отбора проб при различных условиях : СТБ СЕН/TR 15310-1-2018. – Минск : Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2018. – 52 с.
9. Качество почвы. Определение содержания кадмия, хрома, кобальта, меди, свинца, марганца, никеля и цинка, экстрагированных царской водкой из почвы. Пламенный и электротермический методы атомно-абсорбционной спектроскопии : СТБ ИСО 11047-2006. – Минск : Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2006. – 24 с.
10. Продукты пищевые. Методика определения токсичных элементов атомно-эмиссионным методом : ГОСТ 30538-97. – М. : Стандартинформ, 2010. – 31 с.
11. Михальчук, Н. В. Фоновое содержание тяжелых металлов и микроэлементов в почвах и растительности юго-запада Беларуси как основа для сравнительных оценок при производстве органической продукции на основе принципов зеленой экономики / Н. В. Михальчук, А. Н. Мялик // Эколого-географические проблемы перехода к зеленой экономике ; редкол.: В. С. Хомич (гл. ред.), В. Ф. Логинов, Е. В. Санец. – Минск : Строй-МедиаПроект, 2019. – С. 266–281.
12. Об утверждении гигиенических нормативов : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 25 янв. 2021 г. № 37 : с изм. и доп. от 29.11.2022 № 829, 05.12.2024 № 904 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2021. – 5/48783.
13. Об обращении с отходами : Закон Респ. Беларусь от 20 июля 2007 г. № 271-3 : с изм. и доп. от 29 дек. 2023 г. № 333-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2007. – № 183. – 2/1368.
14. О порядке обращения с отходами : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 нояб. 2019 г. № 818 : с изм. и доп. от 06.05.2020 № 271, 17.01.2020 № 16, 30.06.2020 № 388, 25.01.2021 № 36, 17.07.2008 № 1042, 28.11.2019 № 818, 02.07.2021 № 388, 21.12.2021 № 736, 25.03.2022 № 175, 10.05.2023 № 301, 21.06.2023 № 400, 06.09.2024 № 658, 18.06.2024 № 683 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2019. – 5/47436.
15. Об утверждении, введении в действие общегосударственного классификатора Республики Беларусь : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 9 сент. 2019 г. № 3-Т : с изм. и доп. от 02.11.2023 № 11-Т, 20.02.2024 № 7-Т // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2019. – 8/34631.
16. Реестр объектов хранения, захоронения и обезвреживания отходов (хранение, захоронение). – URL: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2025/02/реестр-объектов-хранения-захоронения-и-обезвреживания-отходов-хранение-захоронение-2.pdf> (дата обращения: 20.02.2025).
17. Наличие, образование и движение отходов производства по блокам, группам и подгруппам классификатора отходов. – URL: <https://ecoportal.gov.by/otkhody/nalichie-obrazovanie-i-dvizhenie-otkhodov/otkhody-proizvodstva-po-klassifikatoru> (дата обращения: 11.01.2025).
18. Установить объем, номенклатуру и структуру формирования твердых отходов на территории Беларуси с целью последующей разработки концепции их переработки и утилизации : отчет о НИР / Ин-т геологии, геохимии и геофизики, Ин-т проблем использования природных ресурсов и экологии АН Беларуси ; науч. рук. А. В. Кудельский ; отв. исп. В. С. Хомич. – М., 1992.

19. Басалай, Е. Н. Геоэкологическая оценка влияния городских очистных сооружений на компоненты природной среды (на примере Брестской области) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.03.13 / Басалай Екатерина Николаевна ; НАН Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск, 2023. – 23 с.
20. Петухова, Н. Н. Геохимия почв Белорусской ССР / Н. Н. Петухова. – Минск : Наука и техника, 1987. – 229 с.

References

1. Yanin E. P. *Istochniki i puti postupleniya zagryaznyayushchih veshchestv v reki promyshlennno-urbanizirovannyh regionov* [Sources and routes of pollutants entering the rivers of industrially urbanized regions]. *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty ohrany okruzhayushchej sredy* [Scientific and technical aspects of environmental protection]. Moscow, 2002, vol. 6, pp. 2–56. (in Russian)
2. Basalaj E. N. *Geoekologicheskaya ocenka prigodnosti osadkov gorodskih stochnyh vod dlya razlichnyh vidov ispol'zovaniya (na primere Brestskoj oblasti)* [Geoeological assessment of suitability of urban wastewater sludge for various uses (on the example of Brest region)]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 93–117. (in Russian)
3. Lihacheva A. V. *Ocenka vozdeystviya ilovyh ploshchadok na okruzhayushchuyu sredu v sisteme obrashcheniya s izbytochnym aktivnym ilom* [Assessment of the impact of silt sites on the environment in the system of handling excess activated sludge]. *Novye tekhnologii reciklinga vtorichnyh resursov* [New technologies for recycling secondary resources]. *Materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. int. sci. and techn. conf.]. Minsk, 2001, pp. 159–164.
4. Dregulo A. M. *Transformaciya ilovyh kart v ob"ekty nakoplennoego ekologicheskogo ushcherba: riski, faktory, tehnogenez* [Transformation of silt maps into objects of accumulated environmental damage: risks, factors, and technogenesis]. Moscow, Biblio-Globus Publ., 2019, 270 p. (in Russian)
5. Vaga I. I., Chuhol'skij A. I., Kravchenko A. A., Semashko M. Yu. *Analiz otechestvennyh tekhnologij i peredovyh mirovyh praktik podgotovki osadkov proizvodstvennyh stochnyh vod* [Analysis of domestic technologies and advanced global practices in the treatment of industrial wastewater sludge]. *Pryrodnae asyarooddze Palessia: asablivasci i perspektyvy razvicia* [The natural environment of Polesie: features and prospects of development]. *Zbornik navukovyh prac VIII Mizhnarodnaj navukovaj kanferencyi "Pryrodnae asyarooddze Palessia i navukova-praktychnyya aspekty racyyanal'naga resursakarystannya"* [Proc. VIII Int. sci. conf. "The natural environment of Polesie and sci. and practical aspects of rational resource management"]. Brest, 2022, vol. 14, pp. 152–156. (in Russian)
6. *Ob utverzhdenii RD RB "Metodika otbora prob othodov" (RD RB 0212.6-2002)* [On approval of RD RB "Waste sampling methodology" (RD RB 0212.6-2002)]. *Postanovlenie Ministerstva prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus', 08 yanv. 2003 № 3* [Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 08 January 2003 no. 3]. National legal internet portal of the Republic of Belarus, 2003, 6 p. (in Russian)
7. *Resursosberezenie. Osadki stochnyh vod. Metody otbora i podgotovki prob. GOST R 56226-2014* [Resource conservation. Sewage sludge. Methods of sampling and preparation of samples. GOST R 56226-2014]. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 13 p. (in Russian)
8. *Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Analiticheskij (laboratornyj) kontrol' i monitoring okruzhayushchej sredy. Harakteristika othodov. Otor prob othodov. Ch 1. Rukovodstvo po vyboru i primeneniyu kriteriev otbora prob pri razlichnyh usloviyah : STB CEN/TR 15310-1-2018* [Environmental protection and environmental management. Analytical (laboratory) control and environmental monitoring. Characteristics of waste. Waste sampling. Part 1. Guidelines for the selection and application of sampling criteria under various conditions. STB CEN/TR 15310-1-2018]. Minsk, State committee for standardization of the Republic of Belarus, 2018, 52 p. (in Russian)
9. *Kachestvo pochvy. Opredelenie soderzhaniya kadmiya, hroma, kobal'ta, medi, svinca, marganca, nikelya i cinka, ekstragirovannyh carskoj vodoj iz pochvy. Plamennyj i elektrotermicheskij metody atomno-absorbcionnoj spektrometrii : STB ISO 11047-2006* [Soil quality. Determination of the content of cadmium, chromium, cobalt, copper, lead, manganese, nickel and zinc extracted by aqua regia from the soil. Flame and electrothermal methods of atomic absorption spectrometry. STB ISO 11047-2006]. Minsk, State committee for standardization of the Republic of Belarus, 2006, 24 p. (in Russian)
10. *Produkty pishchevye. Metodika opredeleniya toksichnyh elementov atomno-emissionnym metodom : GOST 30538-97* [Food products. The method of determining toxic elements by atomic emission method. GOST 30538-97]. Moscow, Standartinform Publ., 2010, 31 p. (in Russian)
11. Mihal'chuk N. V., Myalik A. N. *Fonovoe soderzhanie tyazhelyh metallov i mikroelementov v pochvah i rastitel'nostii ugo-zapada Belarusi kak osnova dlya sravnitel'nyh ocenok pri proizvodstve organicheskoy produkcii na osnove principov zelenoj ekonomiki* [Background content of heavy metals and trace elements in soils and vegetation of the South-West of Belarus as a basis for comparative assessments in the production of organic products based on the principles of green economy]. *Ekologo-geograficheskie problemy perekhoda k zelenoj ekonomike* [Ecological and geographical problems of transition to a green economy]. Minsk, 2019, pp. 266–281. (in Russian)
12. *Ob utverzhdenii gigienicheskikh normativov* [On the approval of hygiene standards]. *Postanovlenie Soveta ministrov Respubliki Belarus', 25 yanv. 2021 g. № 37* [Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, January 25, 2021, No. 37]. *S izmeneniyami i dopolneniyami ot 29.11.2022 № 829, 05.12.2025 № 904* [With amendments and additions dated 29 November 2022 no. 829, 5 December 2024 no. 904]. National legal internet portal of the Republic of Belarus, 2021, 5/48783. (in Russian)

13. *Ob obrashchenii s othodami* [On waste management]. *Zakon Respubliki Belarus' ot 20 iyulya 2007 g. № 271-Z* [Law of the Republic of Belarus dated 20 July 2007 no. 271-Z]. *S izmeneniyami i dopolnениyami ot 29 dek. 2023 g. № 333-Z* [With amendments and additions dated 29 December 2023 no. 333-Z]. National legal internet portal of the Republic of Belarus, 2007, no. 183, 2/1368. (in Russian)
14. *O poryadke obrashcheniya s othodami* [On the waste management procedure]. *Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus', 28 noyab. 2019 g. № 818* [Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, 28 November 2019 no. 818]. *S izmeneniyami i dopolnениyami ot 06.05.2020 № 271, 17.01.2020 № 16, 30.06.2020 № 388, 25.01.2021 № 36, 17.07.2008 № 1042, 28.11.2019 № 818, 02.07.2021 № 388, 21.12.2021 № 736, 25.03.2022 № 175, 10.05.2023 № 301, 21.06.2023 № 400, 06.09.2024 № 658, 18.06.2024 № 683* [With amendments and additions dated 05 June 2020 no. 271, 17 January 2020 no. 16, 30 June 2020, no. 388, 25 January 2021 no. 36, 17 July 2008 no. 1042, 28 November 2019 no. 818, 02 July 2021 no. 388, 21 December 2021 no. 736, 25 March 2022 no. 175, 10 May 2023 no. 301, 21 June 2023 no. 400, 06 September 2024 no. 658, 18 June 2024 no. 683]. National legal internet portal of the Republic of Belarus, 2019, 5/47436. (in Russian)
15. *Ob utverzhdenii, vvedenii v dejstvie obshchegosudarstvennogo klassifikatora Respubliki Belarus'* [On the approval and implementation of the national classifier of the Republic of Belarus]. *Postanovlenie Ministerstva prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus' ot 09 sent. 2019 g. № 3-T* [Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus dated 09 September 2019 no. 3-T]. *S izmeneniyami i dopolnениyami ot 02 noyab. 2023 g. № 11-T, 20 fevralya 2024 g. № 7-T* [With amendments and additions dated 02 November 2023 no. 11-T, 20 February 2024 no. 7-T]. National legal internet portal of the Republic of Belarus, 2019, 8/34631. (in Russian)
16. *Reestr ob"ektov khraneniya, zakhoroneniya i obezvrezhivaniya otkhodov (khraneniye, zakhoroneniye)* [The register of objects of storage, burial and neutralization of waste (storage, burial)]. Available at: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2025/02/реестр-объектов-хранения-захоронения-и-обезвреживания-отходов-хранение-захоронение-2.pdf> (accessed 20 February 2025). (in Russian)
17. *Nalichie, obrazovanie i dvizhenie otkhodov proizvodstva po blokam, gruppam i podgruppam klassifikatora otkhodov* [The presence, formation and movement of industrial waste by blocks, groups and subgroups of the waste classifier]. Available at: <https://ecoportal.gov.by/otkhody/nalichie-obrazovanie-i-dvizhenie-otkhodov/otkhody-proizvodstva-po-klassifikatoru> (accessed 11 February 2025). (in Russian)
18. *Ustanovit' ob'em, nomenklaturu i strukturu formirovaniya tverdyh otkhodov na territorii Belarusi s cel'yu posleduyushchej razrabotki koncepcii ih pererabotki i utilizatsii : otchet o NIR* [To establish the volume, nomenclature and structure of solid waste formation on the territory of Belarus for the purpose of subsequent development of the concept of their processing and utilization: report on research work]. *Institut geologii, geohimii i geofiziki, Institut problem ispol'zovaniya prirodnih resursov i ekologii AN Belarusi* [Institute of Geology, Geochemistry and Geophysics, Institute of Problems of Natural Resources Use and Ecology of the Academy of Sciences of Belarus]. *Nauchnyy rukovoditel' A. V. Kudel'skij* [Scientific director A. V. Kudelsky]. *Otvetsvennyy ispolnitel' V. S. Homich* [Responsible executive V. S. Khomich]. Moskva, 1992.
19. Basalaj E. N. *Geoekologicheskaya ocenka vliyaniya gorodskih ochistnyh sooruzhenij na komponenty prirodnoj sredy (na primere Brestskoj oblasti). Avtoreferat dissertatsii kandidata geograficheskikh nauk* [Geoecological assessment of the impact of urban wastewater treatment plants on components of the environment (on the example of the Brest region). Abstract of the diss. cand. geogr. sci.]. Minsk, 2023, 23 p. (in Russian)
20. Petuhova N. N. *Geohimiya pochv Belorusskoj SSR* [Geochemistry of soils of the Belarusian Soviet Socialist Republic]. Minsk, 1987, 229 p. (in Russian)

Информация об авторах

Басалай Екатерина Николаевна – кандидат географических наук (ул. Стафеева, 17, 224007, г. Брест, Беларусь). E-mail: basalaiekaterina@yandex.ru

Хомич Валерий Степанович – доктор географических наук, доцент, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: valery_khomich@mail.ru

Information about the authors

Ekaterina N. Basalai – Ph. D. (Geography) (17, Stafeeva Str., 224007, Brest, Belarus). E-mail: basalaiekaterina@yandex.ru

Valery S. Khomich – D. Sc. (Geography), Associate Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: valery_khomich@mail.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-85-99>
УДК 504.455+504.064+556.55

Поступила в редакцию 31.03.2025
Received 31.03.2025

АНТРОПОГЕННАЯ НАГРУЗКА ПО ТЯЖЕЛЫМ МЕТАЛЛАМ НА ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Е. Ю. Дорожко, Ю. Г. Янута

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Донные отложения представляют собой депонирующую среду, аккумулирующую загрязняющие вещества. Отложения не могут быть классифицированы как почвы или сапропели – из этого следует необходимость подбора метода анализа загрязняющих веществ, присутствие которых может препятствовать их использованию.

В работе в качестве объектов исследования выбраны донные отложения поверхностных водных объектов – р. Лошица (г. Минск), вдхр. Чижовское, р. Титовка (г. Марьина Горка, Минская обл.) и в качестве реперного водного объекта – оз. Сергеевское (аг. п. Сергеевичи, Минская обл.).

В образцах отложений изучали влажность, зольность проб – все пробы отложений обладают высокой влажностью ($W > 50\%$), а зольность меняется от $A_c = 24,24\%$ в оз. Сергеевское до $A_c = 87,62\%$ в р. Лошица. Состав проб исследовали методом элементного анализа с уточнением связей с помощью ИК-спектроскопии – по полученным данным отложения из р. Лошица, вдхр. Чижовское и р. Титовка носят минеральный характер образования, а отложения из оз. Сергеевское присущ естественный характер накопления. Оценка антропогенного влияния на донные отложения проводилась по величине содержания тяжелых металлов – Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Mn с использованием методов экстракционно-фотометрического, атомно-абсорбционного спектроскопии и мокрого озоления для выявления форм тяжелых металлов, связанных с органическим веществом. Антропогенная нагрузка рассчитывалась с помощью геохимического критерия I_{geo} .

Выявлено, что в вдхр. Чижовское наибольшее загрязнение тяжелыми металлами (Cu, Pb, Cr, Ni). Геоаккумуляционный индекс по Cu составил 0,43 (вдхр. Чижовское, прибрежная зона), по Pb – 0,31 (вдхр. Чижовское, центр), по Cr максимум составил 1,92 (вдхр. Чижовское, центр), по Ni максимум составил 1,53 (вдхр. Чижовское, центр).

Ключевые слова: донные отложения; водохранилище; река; озеро; тяжелые металлы; геоаккумуляционный индекс; антропогенная нагрузка.

Для цитирования. Дорожко Е. Ю., Янута Ю. Г. Антропогенная нагрузка по тяжелым металлам на донные отложения поверхностных водных объектов // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 85–99.

ANTHROPOGENIC HEAVY METAL LOADING ON THE BOTTOM SEDIMENTS OF SURFACE WATER BODIES

E. Yu. Dorozhko, Yu. G. Yanuta

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

Abstract. Bottom sediment is the material of long-term substance sedimentation under the influence of physical and chemical processes occurring within a water body. Sediments act as indicators of quality and determine the state of the water body, since they are alluvial deposit that accumulate pollutants. Bottom sediments contain heavy metals that may prevent the use of sediment after removal, if their concentrations exceed the permitted limits. Since sediment can't be attributed to any other natural features such as soil or sapropel, it is necessary to identify methods for the analysis of heavy metals specifically in sediments.

Bottom sediments of surface water resources are selected as research objects – the Loshitsa river (Minsk), Reservoir Chizhovskiy, the Titovka river (Marjina Horka, Minsk region) and as background water object – Sergeevskoye lake (Sergeyevichi agro-town, Minsk region).

Sediment samples were examined for moisture, soiling samples. The composition of the samples was investigated by means of an elemental analysis with a clarification of the bonds by IR spectroscopy. The anthropogenic impact on sediment was assessed according to heavy metal content – Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Mn, using methods of extractometric photometry, atomic absorption spectroscopy and wet ozone to identify heavy metal forms, related to organic matter. Anthropogenic loading was calculated by the geochemical criteria of I_{geo} .

It was found that the most heavy metal pollution (Cu, Pb, Cr, Ni) occurred in reservoir Chizhovsky. Geo-accumulation index for Cu was 0,43 (reservoir Chizhovsky, coastal zone), for Pb – 0,31 (reservoir Chizhovsky, center), for Cr maximum was 1,92 (reservoir Chizhovsky, center), for Ni maximum is 1,53 (reservoir Chizhovsky, center).

Keywords: bottom sediments; reservoir; river; lake; heavy metals; geoaccumulation index; anthropogenic load.

For citation. Dorozhko E. Yu., Yanuta Yu. G. Anthropogenic heavy metal loading on the bottom sediments of surface water bodies. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 85–99.

Введение. Водные ресурсы имеют большое значение для функционирования народного хозяйства Беларуси, обеспечивая водоснабжение, рыболовство и рекреацию. Однако антропогенные источники, включая промышленность и сельское хозяйство, оказывают негативное воздействие на окружающую среду через выбросы в атмосферу, сброс недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы, хранение и захоронение опасных отходов, использование гербицидов и пестицидов в сельском хозяйстве, что приводит к значительному загрязнению водных объектов. Превышение норм по сбросу сточных вод нарушает процессы самоочищения водных объектов, что усугубляет их загрязнение. В 2024 г. в поверхностные водные объекты было сброшено 1120,683 млн м³ сточных вод. Объем сточных вод, сбрасываемых с превышением допустимых норм по химическим и другим веществам, в 2024 г. возрос на 469 тыс. м³ по сравнению с 2023 г. и составил 2,811 млн м³ [1]. В табл. 1 представлены статистические данные поступления загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты [2].

Таблица 1. Поступление загрязняющих веществ со сбросом сточных вод в поверхностные водные объекты, т

Table 1. Inputs of pollutants from sewage discharges to surface water bodies, t

Загрязняющее вещество	Масса загрязняющего вещества, т				
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Хром общий	4	3	3	4	3
Медь	5	5	6	5	3
Цинк	24	25	29	20	17
Свинец	2	1	0,7	0,5	0,1
Никель	3	2	3	4	4
Марганец	3	2	2	3	4

Согласно данным мониторинга поверхностных водных объектов, осуществляемого в рамках программы Национальной системы мониторинга окружающей среды, большинству исследованных водоемов Беларуси в 2024 г. присвоены 2-й и 3-й классы качества по гидрохимическим показателям. В частности, 73,8 % объектов имеют 2-й класс (хорошее состояние), а 22,8 % – 3-й класс (удовлетворительное состояние).

По данным мониторинга р. Свислочь в 2024 г. был присвоен 5-й класс по гидробиологическим и 3-й класс по гидрохимическим показателям, что указывает на ухудшение состояния водотока, связанное с увеличением антропогенного воздействия на водный объект [1].

Одним из ключевых индикаторов состояния водной экосистемы служат донные отложения (ДО), которые являясь депонирующей средой, что позволяет в долгосрочной перспективе оценить антропогенную составляющую воздействия на водный объект.

ДО представляют собой компонент водной экосистемы поверхностного водного объекта, состоящий из осевших твердых и органических частиц, которые образовались и седиментировались на дне в результате физико-химических и биохимических процессов. Эти отложения служат средой, где загрязняющие вещества аккумулируются на протяжении длительного времени [3].

Одной из ключевых проблем водных ресурсов является интенсификация накопления ДО на дне водоемов и водотоков, что приводит к снижению полезного объема водной среды и вторичному загрязнению. Исследования показывают, что ежегодно полезный объем водоема уменьшается на 1 % из-за избытка накопления ДО, влажность которых может достигать 98 % [4].

Наиболее распространенными поллютантами являются тяжелые металлы (ТМ). Они поступают в водный объект в составе сбросов сточных вод промышленных предприятий и выброса твердых частиц промышленных металлообрабатывающих объектов, в результате попадания металлического мусора и смыва с автомагистралей атмосферными осадками, а также смыва пестицидов и гербицидов с сельскохозяйственных полей [5].

Результаты изучения загрязнения ДО водных объектов рассмотрены в работе А. И. Поздняковой: методом спектрального анализа измерено содержание ТМ в ДО и водной растительности, отобранное в водных объектах в зоне наблюдения Белорусской АЭС [6]. В работе Т. И. Дровозовой

исследован коллектор, по которому отводятся дренажные воды с рисовой оросительной системы в р. Дон методом атомно-абсорбционной спектроскопии по таким металлам, как Fe, Mn, Cu, Pb, Zn [7]. Исследование О. В. Лукашева направлено на детальное опробование ДО р. Свислочь, в результате которого выяснено, что город Минск в настоящее время отличается от других населенных пунктов по загрязнению ДО только в отношении V, Cr, Ni и Cu по сравнению с реками Березинского биосферного заповедника. Типизация пунктов опробования ДО г. Минска по концентрации ТМ выполнена с помощью иерархического кластерного анализа, автор разделил пункты на две группы. К группе А относятся участки отбора с аномальными значениями ряда химических элементов, отличающиеся по степени загрязнения ДО и спектру металлов-загрязнителей. В группу В входят относительно чистые (незагрязненные) участки, которые можно разделить на две подгруппы [8]. Б. И. Корженевский в качестве показателей загрязнения и индикатора техногенной нагрузки на территории рассматривает индексы загрязненности микроэлементами Pb, Cd, Zn, As, Cu, Cr, Co, Ni, Fe, Mn ДО малых рек, в том числе притоков р. Клязьма, таких как Уча, Воря, Шерна, Киржач, Липня, Колокша, Пекша, Нерль. Полученные значения ранжированы по классификации и геоклассов, и техногенной нагрузки [9]. Л. Н. Рябовой установлено, что геохимическое состояние ДО в водоемах Брестской области находится в основном в удовлетворительном состоянии, степень загрязненности ТМ оценивается как допустимая. Содержание металлов определено с помощью фотометрического метода анализа. На основании проведенного автором анализа и обобщения полученных данных выполнено построение геохимических карт загрязнения ДО с учетом комплексного показателя антропогенного загрязнения [10].

По проведенной оценке в отложениях можно выделить два применяемых метода анализа ТМ – фотометрический и атомно-абсорбционный. Для определения антропогенной нагрузки по ТМ на водный объект применяют геохимические критерии и критерии геоклассов.

ТМ являются специфичными загрязняющими веществами, относящимися к классу консервативных веществ, которые не покидают водные экосистемы, а под воздействием факторов окружающей среды способны изменять форму своего нахождения в ней. Согласно классификации миграционных процессов, ТМ свойственна физико-химическая миграция, обусловленная воздействием физико-химических факторов, к которым относятся pH среды, минерализация воды, температурный режим [11].

ТМ, поступившие в водную среду, немедленно вовлекаются в цепь разнообразных перемещений и превращений под влиянием многочисленных факторов. В водной экосистеме могут наблюдаться следующие процессы: физические (механическое перемешивание, осаждение, адсорбция и десорбция, улетучивание, фотолиз); химические (диссоциации, гидролиз, комплексообразование, окислительно-восстановительные реакции); биологические (поглощение живыми организмами, разрушение и превращение с участием ферментов и метаболитов), геологические (накопление в ДО и породообразование).

Металлы в растворимой фракции могут находиться в виде гидратированных ионов, неорганических и органических соединений и комплексов, в том числе с хелатообразователями и гуминовыми кислотами, присутствующими в природных водах. Основная часть связанного вещества переходит в ДО, в результате чего донные грунты часто содержат необычайно высокие уровни загрязняющих веществ, в то время как их концентрация в воде может быть не повышена.

Степень токсичности ТМ находится в прямой зависимости от прочности связывания их в комплексы, характеризуемой величиной константы устойчивости [12].

В настоящее время для оценки экологического состояния водоемов необходимо проводить комплексный анализ ДО, которые являются долговременными накопителями загрязняющих веществ, поступающих в результате антропогенной деятельности.

Объекты и методы исследований. Объектом исследования являлись ДО, отобранные в поверхностных водных объектах. В качестве водных объектов пробоотбора ДО выбраны р. Лошица (г. Минск), вдхр Чижовское (г. Минск), р. Титовка (г. Марьино Горка, Пуховичский район, Минская область), оз. Сергеевское (аг. Сергеевичи, Пуховичский район, Минская область). В табл. 2 приведены основные морфометрические характеристики выбранных водных объектов [13].

Таблица 2. Морфометрические характеристики водных объектов

Table 2. Morphometric characteristics of water bodies

Водный объект	Длина, км	Ширина, км	Глубина, м
Река Лошица	9,2	0,2	3,4
Река Титовка	33,0	0,05	2,4
Водохранилище Чижовское	4,8	0,8	5,0
Озеро Сергеевичское (Сергеевское)	2,2	2,2	2,9

Места отбора проб ДО представлены на рис. 1. Пробы ДО отбирали с помощью торфяного бура в прибрежной зоне и в зоне наибольшей аккумуляции вещества – самой глубокой точке и самой непроточной зоне.



Рис. 1. Места отбора проб донных отложений:
а – река Лошица; б – водохранилище Чижовское; в – река Титовка; г – озеро Сергеевское

Fig. 1. Places of sampling of the bottom sediments:
a – river Loshitsa; b – reservoir Chizhovskoy; c – river Titovka; d – lake Sergiyevskoye

Главная водная артерия Минска – р. Свислочь – является частью Вилейско-Минской водной системы, которая была введена в эксплуатацию в 1976 г. с целью более полного обеспечения города водой для промышленности и населения, а также для обводнения и водного благоустройства. Свислочь подвергается высокой антропогенной нагрузке. В ее бассейне 40 предприятий-водопользователей, которые сбрасывают сточные воды непосредственно в водные объекты бассейна [14].

Река Лошица впадает в Свислочь справа, за 1 км до Чижовского водохранилища. В районе ул. Семашко, перед слиянием с р. Мышка, Лошица принимает воды ливневого коллектора Слепянка, который собирает ливневые стоки. Отложения представляют собой песчано-илистую фракцию с характерным нефтяным запахом.

Чижовское водохранилище расположено в юго-восточной части Минска на р. Свислочь, предназначено для нужд технического водоснабжения. Оно испытывает значительное антропогенное воздействие, длительно накапливает отложения на дне. Водохранилище пропускает речные воды из Свислочи и все сточные воды с территории города. Сегодня водохранилище снабжает технической водой Минскую ТЭЦ-3 и 16 предприятий города. ДО водохранилища относятся к песчано-илистой фракции с нефтяным запахом.

Река Титовка берет свое начало от р. Птичь. Она впадает в Свислочь с правого берега. От истока у д. Загай река канализирована. В пределах г. Марьиной Горка на Титовке создана группа искусственных водоемов. Антропогенное воздействие на реку оказывается промышленными предприятиями: поступление твердых частиц с газопылевыми выбросами предприятий, занимающихся литьем и механической обработкой металла, сброс сточных вод и смыв загрязняющих веществ талыми и дождевыми водами с автомобильных дорог. Отложения представляют собой песчаную фракцию с нефтяным запахом.

Озеро Сергеевичское (Сергеевское) расположено в пределах Минской области, на территории Пуховичского района. Берега озера заболочены, к водоему прилегают разливы, образовавшиеся в котловинах, оставшихся после выемки торфа. ДО представлены илистой фракцией с землистым запахом.

Цвет ДО обусловлен окислительно-восстановительными условиями, содержанием и составом органического вещества, сульфидов, гидроксидов железа и марганца и описывается полутонами (беловато-серый, темно-серый, желто-серый, черно-серый и др.). Запах ДО зависит от состава аккумулярованных веществ и определяется органолептически после отбора проб. Консистенция в значительной мере зависит от наличия в них воды.

Общетеchnические показатели объекта исследований определяли согласно [15]. Значения влажности (W , %) находили при температуре 105 ± 2 °C в лабораторном сушильном шкафу SNOL 75/350 до постоянной массы. Определение зольности проводили в тех же тиглях для нахождения значения влажности образца при температуре 500–600 °C в муфельной печи SNOL 8,2/1100.

Элементный состав ДО определяли с помощью универсального элементного анализатора газов CHNS-O, Cl модификации Vario EL cube фирмы ELEMENTAR.

ИК-спектры образцов ДО выявляли на ИК Фурье-спектрометре Shimadzu IRPrestige-2. Метод подготовки пробы ДО для анализа – таблетирование с KBr.

ТМ в составе ДО могут находиться в различных соединениях. С целью дифференциации содержания ТМ в ДО проводили определение валового и подвижного количества ТМ. Пробоподготовка ДО для изучения содержания поллютантов включала высушивание, измельчение и растирание навески отложений. Валовые формы ТМ анализировали с помощью экстрагирующего агента – раствора HNO_3 : HCl , подвижные формы – с помощью $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ с pH 4,8.

В качестве приоритетных ТМ были определены Ni, Cu, Pb, Zn, Cr, Mn. Анализировали содержание металлов двумя методами физико-химического анализа – последовательным экстракционно-фотометрическим методом и методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Фотометрическое определение металлов проводили с помощью спектрофотометра СФ-46. Для метода атомно-абсорбционной спектроскопии применяли атомно-абсорбционный спектрофотометр Shimadzu atomic-absorption spectrophotometer AA-7800.

Ионы Cu (II) определяли с помощью метода, основанного на взаимодействии раствора меди с диэтилдитиокарбаматом свинца в среде CCl_4 с образованием желто-коричневого диэтилдитиокарбомата меди, растворимого в слое органического растворителя. Измеряли светопоглощение при длине волны (λ) 430 нм.

Содержание Zn (II) измеряли дитизоновым методом, основанным на образовании окрашенного в красный цвет соединения цинка с дитизоном с дальнейшим извлечением дитизоната цинка в слой CCl_4 (при pH 4,5–4,8) при $\lambda = 540$ нм.

Анализировали содержание Pb (II) плюмбоновым методом, основанном на образовании (при pH 7,0–7,3) соединения свинца с сульфарсазеном, окрашенного в желто-оранжевый цвет. Свинец предварительно экстрагировали дитизоном в CCl_4 (при pH 9,2–9,6). Оптическую плотность раствора комплексного соединения измеряли при $\lambda = 515$ нм.

Cr (VI) определяли по методике, основанной на измерении светопоглощения при $\lambda = 540$ нм окрашенного (красно-фиолетового) комплексного соединения 1,5-дифенилкарбазоната Cr (III).

Ионы Ni (II) анализировали с диметилглиоксимом с образованием комплексного соединения розового цвета. Максимум светопоглощения соответствовал $\lambda = 490$ нм.

Mn (II) определяли каталитическим окислением соединений марганца персульфатом калия до перманганат-ионов при $\lambda = 540$ нм.

Определение форм металла, связанного с органическим веществом, проводили методом мокрого озонения. Навеску образца ДО подвергали озонению в муфельной печи SNOL 8,2/1100 при температуре 700 °C с последующим растворением золы в концентрированной HNO_3 [16]. Количество связанных форм металла с органическим веществом рассчитывали как разность между валовыми формами металлов без озонения и валовых форм, подвергшихся озонению.

Антропогенную нагрузку на ДО по металлам (табл. 3) рассчитывали с помощью геоаккумуляционного индекса (geo-accumulation index), для которого выделяют семь классов (от 0-го до 6-го) с соответствующим уровнем загрязнения (от незагрязненных до критически загрязненных) [17].

Таблица 3. Градация геоаккумуляционного индекса и классификация уровня загрязнения

Table 3. Classification of the geoaccumulation index and pollution level

Значение I_{geo}	Класс I_{geo}	Уровень загрязнения донных отложений
$I_{\text{geo}} < 0$	0	Незагрязненные
$0 \leq I_{\text{geo}} < 1$	1	Умеренно загрязненные (нижний предел)
$1 \leq I_{\text{geo}} < 2$	2	Умеренно загрязненные (верхний предел)
$2 \leq I_{\text{geo}} < 3$	3	Сильнозагрязненные
$3 \leq I_{\text{geo}} < 4$	4	Очень сильнозагрязненные
$4 \leq I_{\text{geo}} < 5$	5	Экстремально загрязненными
$I_{\text{geo}} > 5$	6	Критически загрязненные

Геоаккумуляционный индекс рассчитывали по формуле

$$I_{\text{geo}} = \frac{\log_2(C_n)}{1,5(B_n)}, \quad (1)$$

где I_{geo} – геоаккумуляционный индекс; C_n – измеренная концентрация ТМ; 1,5 – коэффициент, который минимизирует эффект от возможной вариации фона; B_n – фоновое содержание ТМ.

Результаты и их обсуждение. Отобранные пробы ДО представляют собой различные по свойствам и составу материалы. На месте отбора определили органолептические характеристики отложений. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Органолептические характеристики проб донных отложений

Table 4. Organoleptic characteristics of the bottom sediment samples

Водный объект	Цвет	Запах	Консистенция	Тип отложений
Река Лошица	Черно-серый	Нефтяной	Мягкие	Песчано-илистый
Водохранилище Чижевское	Черный	Нефтяной	Мягкие	Песчано-илистый
Река Титовка	Черный	Нефтяной	Жидкие	Песчаный
Озеро Сергеевское	Черный	Землянистый	Жидкие	Илистый

Нефтяной запах присущ отложениям из р. Лошица, вдхр Чижевское и р. Титовка. Наличие нефтяного запаха свидетельствует о месторасположении водного объекта в черте города – большинство нефтепродуктов поступает в воду в результате смыва с автомобильной дороги атмосферными осадками. Наличие в ДО нефтепродуктов, выявленных с помощью органолептических исследований, может быть связано с поглощением минеральными и органическими примесями нефтепродуктов и последующим осаждением таких агрегатов. Консистенция ДО из р. Титовка и оз. Сергеевское указывает на значительную влажность образцов. Отложениям из р. Лошица и вдхр Чижевское больше присуща мягкая консистенция ввиду большого содержания минеральных включений. Для отложений из р. Лошица и вдхр Чижевское присущ песчано-илистый тип – песок частично покрыт илом, ДО из р. Титовка полностью представлены песком, отложения из оз. Сергеевское – илом.

Важными характеристиками ДО являются влажность и зольность образцов, значения которых содержатся в табл. 5.

Таблица 5. Влажность и зольность отобранных проб донных отложений

Table 5. Humidity and ash-content of the bottom sediment samples

Водный объект	Влажность (W , %)	Зольность (A_c , %)
Река Лошица	54,89	87,62
Водохранилище Чижевское	65,77	83,43
Река Титовка	74,09	82,11
Озеро Сергеевское	91,91	24,23

Наибольшая влажность ($W = 91,91$ %) присуща ДО, отобранным из оз. Сергеевское. Это свидетельствует о том, что состав отложений представлен карбонатными сапропелями. Наименьшую влажность ($W = 54,89$ %) имеют отложения из р. Лошица, что связано с песчаным типом отложений и высокой минерализацией. Отложения рек и вдхр Чижевское имеют высокую зольность ввиду проточности водного объекта и поступления минеральных веществ с берегов и из стока, в то время как отложения из оз. Сергеевское обладают наименьшей зольностью ввиду большого содержания органического вещества.

Результаты элементного состава ДО представлены в табл. 6.

Наиболее богатыми органическим веществом являются отложения из оз. Сергеевское, на что указывает большая доля углерода в их составе. Значительное содержание углерода (до 39,67 %) и азота (до 2,74 %) в ДО озера может свидетельствовать о наличии большого количества органического материала и высокой продуктивности экосистемы. Большой процент содержания кислорода в отложениях рек и водохранилища свидетельствует о содержании в их структуре кислородосодержащих групп – карбоксильных и гидроксильных. Относительно высокое содержание азота в отложениях оз. Сергеевское указывает на значительное содержание амидных и аминок групп в составе отложений.

В табл. 7 представлены атомные соотношения $C : N$, $H : C$ и $O : C$ в пробах ДО.

Таблица 6. Элементный состав донных отложений

Table 6. Elemental composition of the bottom sediment samples

Водный объект	Массовые соотношения, %				Атомные соотношения, %			
	N	C	H	O	N	C	H	O
Река Лошица: прибрежная зона русло	0,35	5,64	1,77	91,96	0,31	5,87	21,96	71,86
	0,32	4,61	2,12	92,67	0,27	4,62	25,34	69,76
Водохранилище Чижевское: прибрежная зона центр	0,54	6,44	1,28	91,16	0,51	7,10	16,84	75,54
	0,39	5,03	1,37	92,83	0,30	5,50	17,87	76,26
Река Титовка: прибрежная зона русло	0,49	6,00	1,45	91,77	0,45	6,48	18,66	74,40
	0,51	6,79	1,48	90,77	0,50	0,58	20,34	78,57
Озеро Сергеевское: прибрежная зона центр	2,74	39,67	6,15	51,04	1,52	25,82	47,71	24,94
	2,73	37,79	5,04	54,08	1,66	26,84	42,66	28,84

Таблица 7. Атомные соотношения в пробах отложений

Table 7. Atomic ratio in bottom sediments samples

Водный объект	C : N	H : C	O : C
Река Лошица: прибрежная зона русло	18,79	3,74	12,24
	16,80	5,48	15,09
Водохранилище Чижевское: прибрежная зона центр	13,91	2,37	10,63
	15,04	3,25	13,86
Река Титовка: прибрежная зона русло	14,28	2,88	11,48
	15,53	2,60	10,04
Озеро Сергеевское: прибрежная зона центр	16,88	1,85	0,97
	16,14	1,59	1,07

Соотношение C : N рассматривается как индикатор гумификации. Большое значение C : N свидетельствует о медленном разложении органического вещества в отложениях р. Лошица и оз. Сергеевское. Соотношение H : C указывает на ароматичность и стабильность соединений. Низкое значение H : C для оз. Сергеевское свидетельствует о большей устойчивости органических веществ к разложению. Это может привести к накоплению гумусовых веществ в ДО. Отношение O : C указывает на полярность и избыток кислорода. С увеличением содержания фенольных гидроксидов возрастают атомные соотношения O : C, т. е. увеличивается процент содержания кислорода, а с ростом содержания водорода увеличивается содержание карбоксильных групп. Кроме того, эти группы активно участвуют в сорбции ТМ [18].

Для изучения особенностей связей в отложениях получены ИК-спектры отобранных образцов. Результаты представлены на рис. 2.

Полученные ИК-спектры отложений р. Лошица и вдхр Чижевское имеют явную схожесть органического состава в области волновых чисел 3650–3200 см⁻¹ с максимумом в 3618 см⁻¹, что указывает на наличие свободных гидроксильных групп, связанных водородными связями, и в интервале 3500–3100 см⁻¹ с максимумом 3426 см⁻¹, что характеризует наличие N–H-валентных колебаний, более выраженных в отложениях р. Лошица. Большой пик наблюдается в интервале 1790–1690 см⁻¹ с максимумом 1435 см⁻¹ и определяется наличием ароматических соединений в отложениях прибрежной зоны р. Лошица и центра вдхр Чижевское. Минеральная часть колебаний представлена соединениями SiO (1100–900 см⁻¹) с двумя максимумами – 1080 и 1034 см⁻¹ – в прибрежной зоне р. Лошица и всех отложениях вдхр Чижевское. Содержание силоксанов подтверждается максимумом 880 см⁻¹ в интервале 1000–100 см⁻¹. В отложениях фиксируются примеси карбонатов в интервале 1500–1400 см⁻¹. Содержание соединений железа определяется наличием узкой полосы при максимуме 644 см⁻¹ в интервале 600–200 см⁻¹.

Органическая часть отложений р. Титовка представлена содержанием спиртов и фенолов с максимумом 3422 см⁻¹ в интервале 3650–3200 см⁻¹, в диапазоне 3450–3300 см⁻¹ фиксируется широкий спектр вторичных аминов. Максимум 1620 см⁻¹ широкой полосы в интервале 1625–1575 см⁻¹ указывает на наличие амидных структур. Соединения кремния фиксируются в максимуме 1080 см⁻¹, минеральная часть так же, как и в отложениях р. Лошица и вдхр Чижевское, представлена силоксанами и соединениями железа в максимуме 694 см⁻¹.

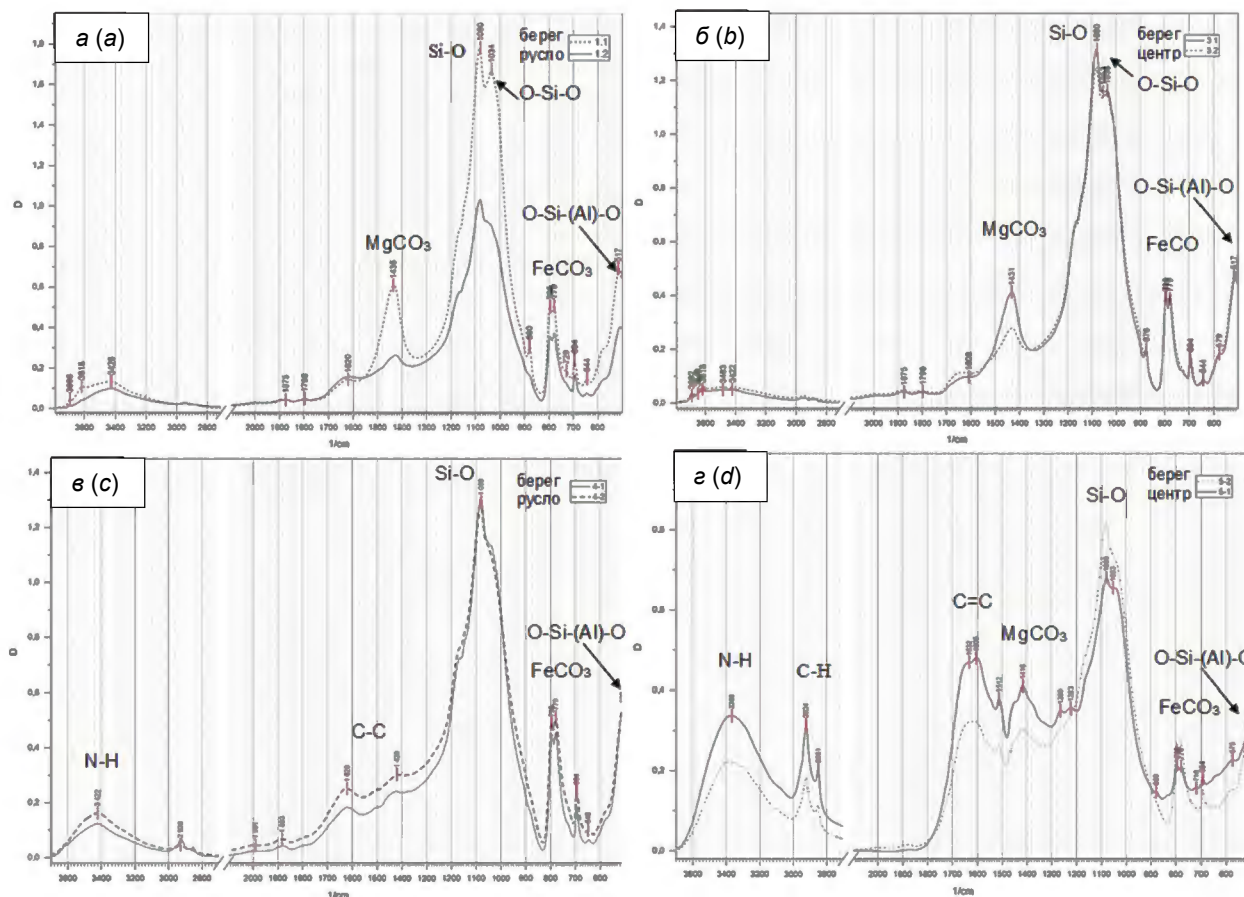


Рис. 2. ИК-спектры образцов донных отложений:
а – река Лощица; б – водохранилище Чижовское; в – река Титовка; г – озеро Сергеевское

Fig. 2. IR-spectra of the bottom sediment samples:
a – river Loshitsa; b – reservoir Chizhovskoye; c – river Titovka; d – lake Sergeevskoye

Отложения оз. Сергеевское отличаются значительным органическим составом, который представлен широким пиком свободных гидроксильных групп, содержанием спиртов, фенолов в максимуме 3368 см^{-1} . Метильные и метиленовые группы встречаются в двух узких полосах при максимумах 2924 и 2851 см^{-1} . Амидная часть фиксируется в интервале $1625\text{--}1575\text{ см}^{-1}$ в максимумах 1632 и 1605 см^{-1} . Присутствие ароматических колец с различными типами замещения представлены в интервале $1525\text{--}1475\text{ см}^{-1}$. Минеральная часть отложений представлена большим пиком соединений кремния в интервале $1100\text{--}1000\text{ см}^{-1}$. Силоксановая составляющая выражена гораздо меньше, чем в других анализируемых отложениях. Вода играет важную роль в процессах сапротелеобразования, именно она позволяет кремнию образовывать органо-минеральные комплексы, которые легко усваиваются биотой (SiO_2bio). Адсорбированная вода фиксируется в пиках 1630 см^{-1} [19].

Одним из методов, применимых для определения концентрации металлов в ДО, стал фотометрический. Результаты фотометрического метода анализа концентрации ТМ представлены на рис. 3.

Другим методом определения ТМ стал метод атомно-абсорбционной спектроскопии. Результаты представлены на рис. 4.

Метод атомно-абсорбционной спектроскопии является более чувствительным по отношению к микроколичествам ТМ. Этот метод обычно обладает высокой точностью, особенно для металлов, таких как Cu, Pb и Zn. Он позволяет обнаруживать очень низкие концентрации, что делает его предпочтительным для анализа загрязненных образцов. Атомно-абсорбционная спектроскопия позволяет избежать интерференции от других элементов, что важно для точного количественного анализа. Фотометрия может быть менее чувствительной по сравнению с атомно-абсорбционным методом. Однако для Pb допустимо использовать комплексообразующие реактивы, что позволяет повысить его чувствительность.

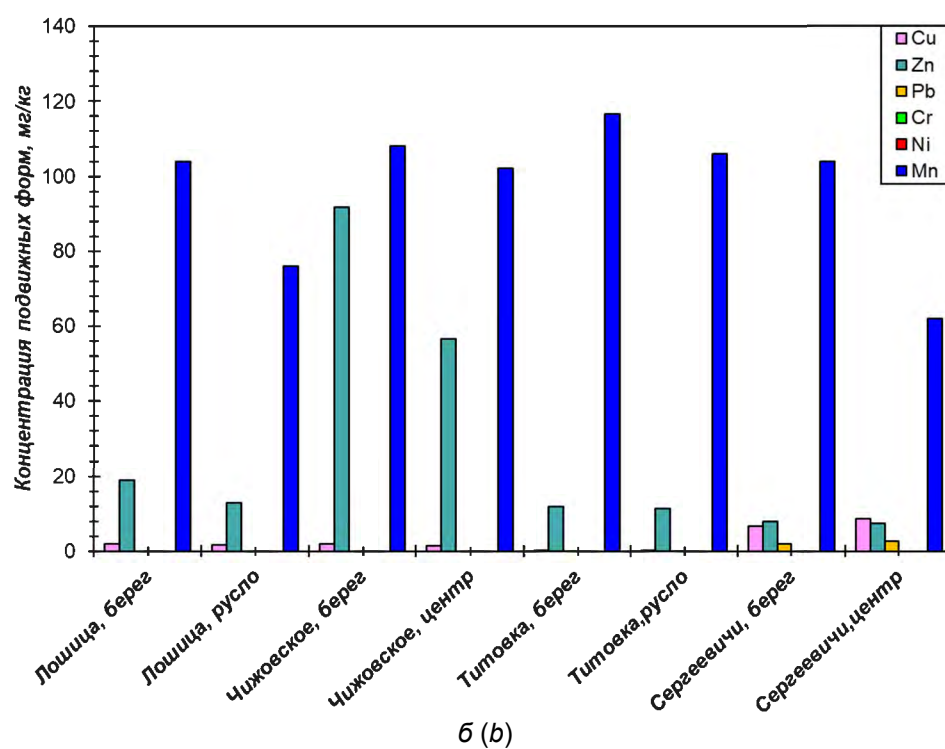
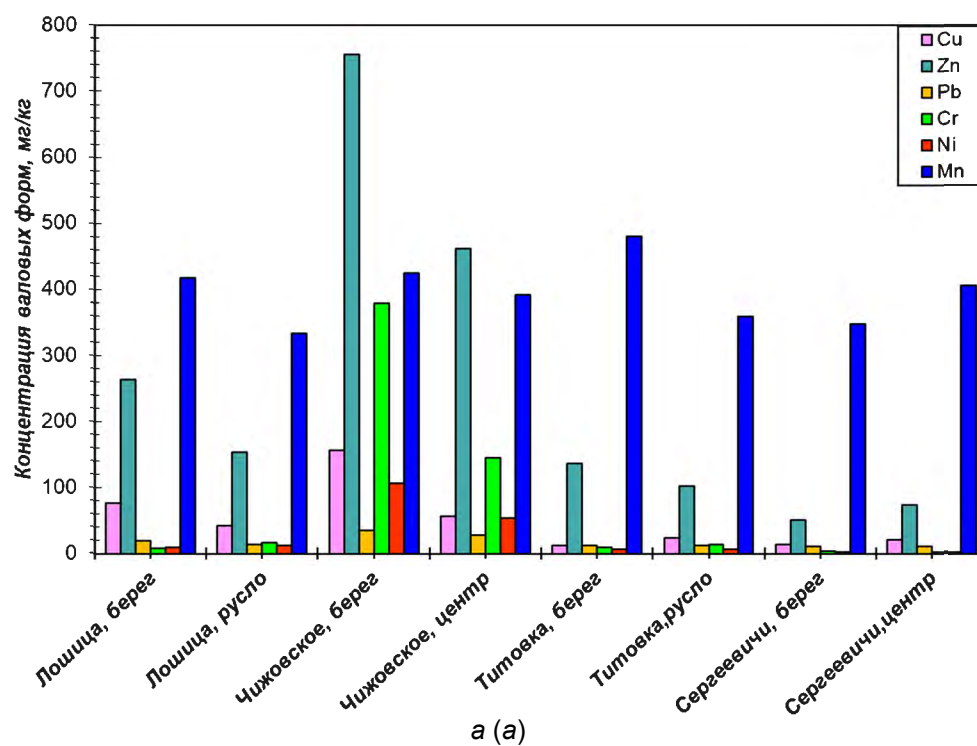


Рис. 3. Результаты фотометрического метода анализа валовых (а) и подвижных (б) форм тяжелых металлов в донных отложениях

Fig. 3. Results of the photometric method for analysis of gross (a) and mobile (b) heavy metals forms in bottom sediment

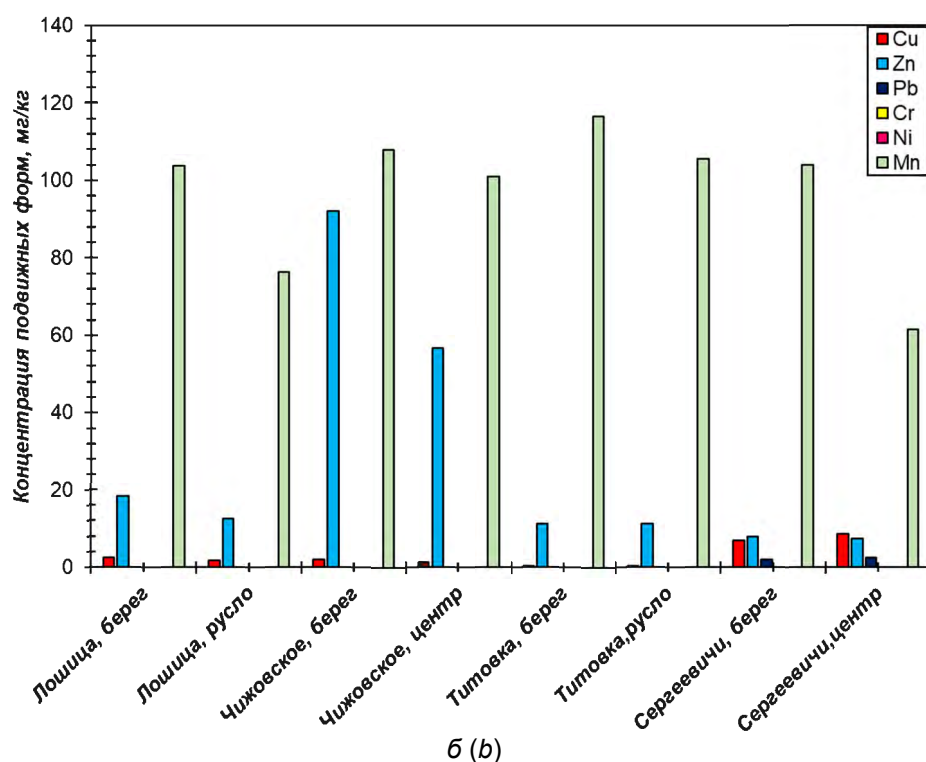
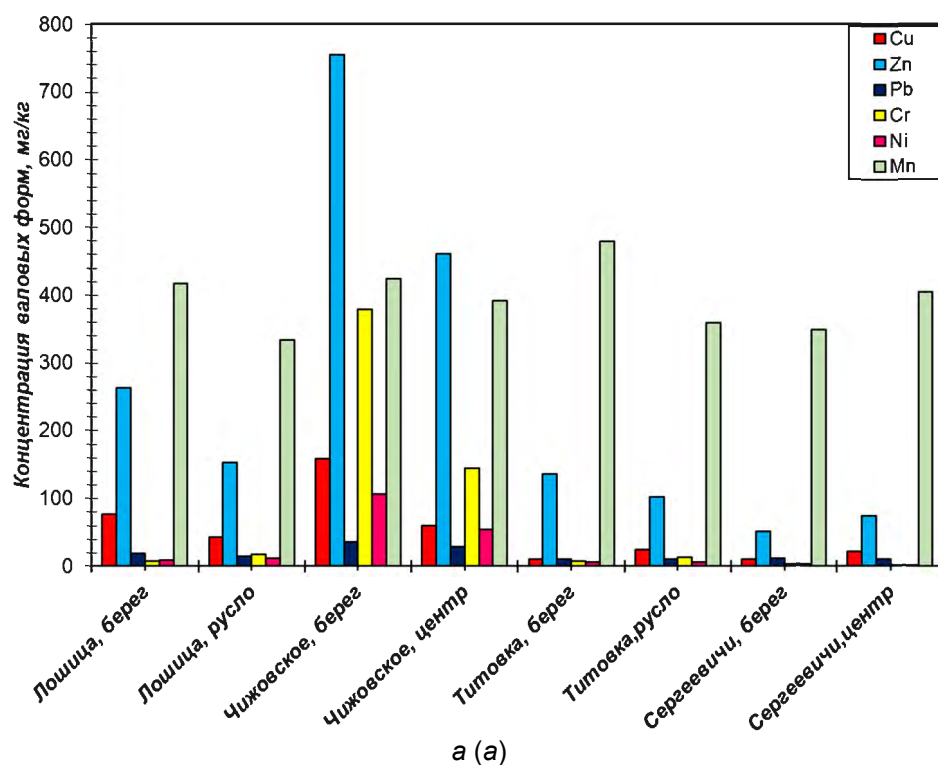


Рис. 4. Результаты атомно-абсорбционного метода анализа валовых (а) и подвижных (б) форм тяжелых металлов в донных отложениях

Fig. 4. Results of the atomic absorption method for analysis of gross (a) and mobile (b) heavy metal forms in bottom sediment

Содержание Cu варьирует в интервале 10,7–158,3 мг/кг, максимальное значение приходится на отложения прибрежной зоны вдхр Чижевское, а наименьшее – прибрежной зоны р. Титовка. Наибольшее содержание Zn (755 мг/кг) фиксируется в отложениях прибрежной зоны вдхр Чижевское,

наименьшее значение (52 мг/кг) – прибрежной зоны оз. Сергеевское. Концентрация Cr в отложениях варьирует в интервале 2,5–145,5 мг/кг, максимальное значение наблюдается в отложениях вдхр Чижовское, а минимальное – в центре оз. Сергеевское. Содержание Mn наблюдается в каждой пробе отложений и варьируется в интервале 348–480 мг/кг, максимальное значение – в прибрежной зоне р. Титовка, а минимальное – в прибрежной зоне оз. Сергеевское. В минимальных значениях накапливаются Pb и Ni – содержание Pb варьируется в пределах 10,1–35,9 мг/кг: минимум концентрации приходится на отложения из русла р. Титовка, а максимум – на прибрежную зону вдхр Чижовское; содержание Ni изменяется в интервале 2,5–106,0 мг/кг, при этом максимальное значение отмечено в отложениях прибрежной зоны вдхр Чижовское, а минимальное – в центре оз. Сергеевское.

При рассмотрении подвижности форм металлов выяснено, что фиксируемыми подвижными формами обладают Cu, Zn, Mn, Pb со следующими результатами подвижности: максимум подвижности Cu (30,54 %) фиксируется в отложениях прибрежной зоны оз. Сергеевское; для Mn максимум подвижности (14,91 %) наблюдается в прибрежной зоне оз. Сергеевское; Zn с максимумом (7,5 %) фиксируется в прибрежной зоне оз. Сергеевское; подвижное содержание Pb – только в отложениях оз. Сергеевское, максимум подвижности (12,5 %) – в центре оз. Сергеевское. Основными агентами закрепления как в прочно, так и в непрочном связанном состоянии Cu, Pb, Zn выступают органическое вещество и несиликатные минералы. Тем не менее их связь с Cu, Pb, Zn проявляется по-разному, в зависимости от степени загрязнения. При разных уровнях техногенной нагрузки в удерживании Cu и Pb принимает активное участие органическое вещество. Основной вклад в подвижность форм вносят органические комплексы с фульвокислотами, карбоновыми кислотами, фенолами и аминокислотами. В результате связывания металлов с повышенной подвижностью в составе неустойчивых органических веществ может происходить вторичное загрязнение водного объекта ТМ в результате разрушения комплексов и высвобождения иона металла.

В исследованиях О. В. Лукашева максимальные средние концентрации Ni, Cr, Cu, Zn, Mn установлены в ДО рек Минска: максимумы Ni (382 мг/кг), Cu (163 мг/кг), Zn (757 мг/кг), а максимумы Cr (1341 мг/кг) и Mn (1811 мг/кг) фиксируются вблизи выхода ливневой канализации РУП «Станкостроительный завод им. С. М. Кирова». Максимальное содержание Pb характерно для ДО водохранилищ с максимумом концентрации 81,4 мг/кг в вдхр Чижовское [8]. В рамках данного исследования установлено, что на объекты р. Лошица, вдхр Чижовское, р. Титовка, оз. Сергеевское оказывается аномальная антропогенная нагрузка только по Zn, Mn, Cr, Cu. При этом максимум Zn (755 мг/кг) фиксируется в отложениях вдхр Чижовское – в сравнении с результатами О. В. Лукашева металл находится на прежнем уровне, максимум Cu (158,3 мг/кг) наблюдается в ДО вдхр Чижовское – металл находится в том же содержании, отличаясь лишь по микроколичеству. Содержание Cr имеет максимум 145,5 мг/кг, что в 9,3 раза меньше, чем в исследованиях О. В. Лукашева. Максимум Mn (488 мг/кг) в 3,8 раза меньше, чем его максимум в исследованиях О. В. Лукашева. Полученные результаты показывают, что антропогенная нагрузка по Zn и Mn осталась на прежнем уровне, а по Cr и Mn уменьшилась.

Для выявления форм металлов, способных выступать в качестве источников вторичного загрязнения водного объекта, проведено определение содержания форм ТМ, ассоциированных с органическими веществами, результаты которого представлены на рис. 5.

В отложениях р. Лошица и вдхр Чижовское большая часть органического вещества связана с Cu с минимальным содержанием (49,9 %) в отложениях центра вдхр Чижовское и максимумом (69,01 %) в ДО прибрежной зоны р. Лошица; органические формы Zn изменяются в интервале 54,75–59,47 % с минимумом в прибрежной зоне р. Лошица и максимумом в русле реки; Mn связан с органической частью в минимальном количестве (30,62 %) в прибрежной зоне р. Лошица, максимум содержания органических комплексов фиксируется (52,94 %) в прибрежной зоне вдхр Чижовское. Большое количество органических форм меди связано с высокой устойчивостью комплекса, процесс комплексобразования происходит за счет свободных гидроксильных групп соединений, входящих в состав ДО.

Для отложений р. Титовка имеется противоположная зависимость накопления органических форм Cu и Zn: для прибрежной зоны характерно в большей степени накопление Cu (84,12 %), в то время как в русле реки накапливаются органические комплексы Zn (90,17 %). В прибрежных отложениях также фиксируются органические формы Pb (36,69 %), что связано с большим, по сравнению с отложениями р. Лошица и вдхр Чижовское, содержанием гидроксильных групп и азотсодержащих соединений.

Большое количество валовых форм металлов (80,36 %) в оз. Сергеевское связано в составе с органическим веществом. Наибольшее количество приходится на Cu, Zn, Pb. Металлы могут координироваться с органическими лигандами, образуя комплексные соединения. Это взаимодействие является особенно сильным для металлов, которые имеют высокую электроотрицательность и могут создавать устойчивые комплексы с органическими молекулами. Cu и Pb образуют более прочные комплексы с органическими веществами благодаря их способности к образованию координационных соединений.

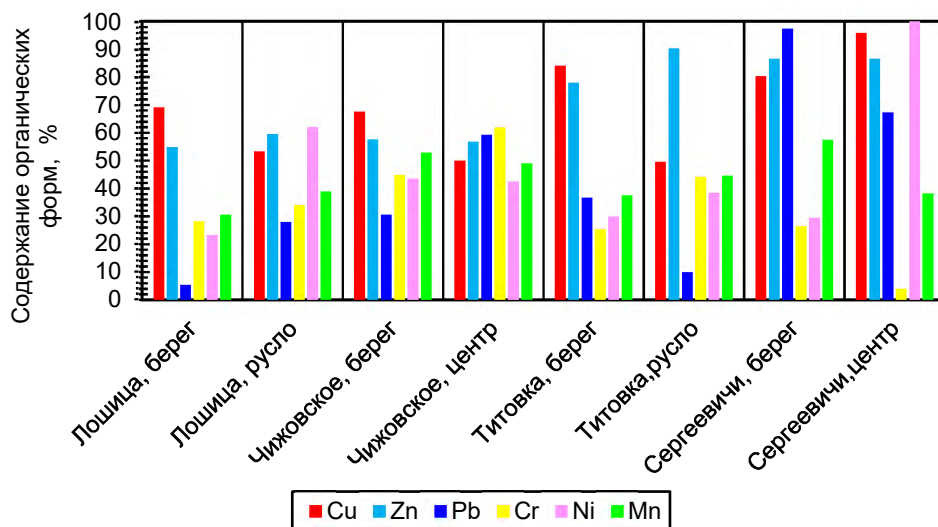


Рис. 5. Концентрации форм тяжелых металлов, связанных с органическим веществом

Fig. 5. Concentration of heavy metal forms, associated with organic matter

Антропогенную нагрузку рассчитывали с использованием геохимического критерия. В качестве фонового образца отложений принимали ДО, отобранные из оз. Сергеевское, ввиду минимальной антропогенной нагрузки на осадки. Результаты расчета представлены в табл. 8. Уровень загрязнения ДО определяли по классу рассчитанного I_{geo} (см. табл. 3).

Таблица 8. Значения индекса геоаккумуляции тяжелых металлов для отобранных проб донных отложений

Table 8. Values of the heavy metal geoaccumulation index of the bottom sediment samples

Водный объект	I_{geo}						Уровень загрязнения отложений
	(Cu)	(Zn)	(Pb)	(Cr)	(Ni)	(Mn)	
Река Лошица:							
прибрежная зона	0,37	0,1	0,25	0,55	0,61	0,017	Умеренно загрязненные (нижний предел) по Cu, Zn, Pb, Cr, Ni и незагрязненные по Mn
русло	0,16	0,06	0,25	1,10	0,96	0,014	Умеренно загрязненные (нижний предел) по Cu, Pb, Ni, умеренно загрязненные (верхний предел) по Cr и незагрязненные по Zn, Mn
Водохранилище Чижевское:							
прибрежная зона	0,43	0,12	0,3	1,68	1,32	0,016	Умеренно загрязненные (нижний предел) по Cu, Zn, Pb, умеренно загрязненные (верхний предел) по Cr, Ni и незагрязненные по Mn
центр	0,18	0,08	0,31	1,92	1,53	0,014	Умеренно загрязненные (нижний предел) по Cu, Pb, умеренно загрязненные (верхний предел) по Cr, Ni и незагрязненные по Zn, Mn
Река Титовка:							
прибрежная зона	0,2	0,09	0,2	0,58	0,49	0,017	Умеренно загрязненные (нижний предел) по Cu, Pb, Cr, Ni и незагрязненные по Zn, Mn
русло	0,14	0,06	0,21	1,01	0,72	0,014	Умеренно загрязненные (нижний предел) по Cu, Pb, Ni, Cr и незагрязненные по Zn, Mn

Геоаккумуляционный индекс по каждому металлу изменяется в следующих интервалах: Cu имеет максимум 0,43 (вдхр Чижевское, прибрежная зона) и минимум 0,14 (р. Титовка, русло); для Zn максимум составляет 0,12 (вдхр Чижевское, прибрежная зона), а минимум – 0,06 (р. Лошица, русло и р. Титовка, русло); Pb имеет максимум 0,31 (вдхр Чижевское, центр) и минимум 0,20 (р. Титовка, прибрежная зона); для Cr максимум составляет 1,92 (вдхр Чижевское, центр), а минимум – 0,55 (р. Лошица, прибрежная зона), Ni имеет максимум 1,53 (вдхр Чижевское, центр) и минимум 0,49 (р. Титовка, прибрежная зона); для Mn максимум составляет 0,017 (р. Лошица, прибрежная зона и р. Титовка, прибрежная зона), а минимум – 0,014 (вдхр Чижевское, центр и русло).

Наибольшее загрязнение по ТМ наблюдается в вдхр Чижевское, наибольшая антропогенная нагрузка создается от Cr и Ni. Антропогенное воздействие на водохранилище оказывается в результате сброса недостаточно очищенных ливневых стоков, осаждения твердых частиц из пылегазовых выбросов промышленных предприятий и в результате смыва атмосферными осадками.

Заключение. В результате анализа состава и свойств отобранных проб ДО установлено, что процесс образования и накопления осадков предусматривает наличие минеральных и органических форм вещества в отложениях.

В результате аналитических испытаний получили, что все пробы отложений обладают высокой влажностью ($>50\%$), а зольность меняется от минимального значения ($A_c = 24,24\%$) у ДО, отобранных в оз. Сергеевское, до максимального значения ($A_c = 87,62\%$) у ДО из р. Лошица. Высокой зольностью обладают ДО, отобранные из водных объектов, расположенных в черте города – р. Лошица, вдхр Чижевское и р. Титовка, что свидетельствует о преобладании минерального вещества в пробах. Низкая зольность проб отложений из оз. Сергеевское подтверждает преобладание органического вещества в составе ДО.

По исследованиям состава C, H, N, O элементного анализа и полученным ИК-спектрам видно, что отложения из р. Лошица, вдхр Чижевское и р. Титовка носят минеральный характер образования с преимущественными структурами кремниевых конкреций, кальцита и силиконов, а отложениям из оз. Сергеевское присущ более естественный характер накопления ввиду большого количества органического вещества амидных структур.

В ходе проведенных исследований методов анализа концентрации ТМ в ДО можно сделать вывод о том, что наиболее чувствительным является метод атомно-абсорбционной спектроскопии. Фотометрический метод при совместном присутствии менее чувствителен к малым концентрациям ионов ТМ, что не обуславливает его применение в качестве репрезентативного метода анализа донных осадков.

Наибольшей подвижностью обладают металлы Zn и Mn, что связано с закреплением металла в органических комплексах фульвокислот, карбоновых кислот, фенолов и аминокислот. В связи с этим неустойчивость органических комплексов с металлами может привести к вторичному загрязнению водного объекта.

Наибольшая антропогенная нагрузка по ТМ (Cu, Pb, Cr, Ni) обнаружена в отложениях рек Лошица и Титовка, а также в вдхр Чижевское. Cr и Ni имеют наиболее высокие уровни загрязнения, особенно в руслах рек и центре водохранилища. Содержание Mn во всех водных объектах находится на допустимом уровне.

Список использованных источников

1. Минский областной комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды : [сайт]. – Минск, 2018–2025. – URL: <https://minoblpriroda.gov.by> (дата обращения: 04.03.2025).
2. Национальный статистический комитет Республики Беларусь : [сайт]. – Минск, 2018–2025. – URL: <https://www.belstat.gov.by/> (дата обращения: 04.03.2025).
3. Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь : [сайт]. – Минск, 2017–2025. – URL: <https://www.nsmos.by> (дата обращения: 04.03.2025).
4. Байков, В. Н. Речная гидравлика и свойства русловых отложений на урбанизированных территориях / В. Н. Байков, В. А. Курочкина, Д. В. Писарев // Вестник Могилёвского государственного строительного университета. – 2011. – № 2. – С. 221–227.
5. Jaskuła, J. Analysis of spatial variability of river bottom sediment pollution with heavy metals and assessment of potential ecological hazard for the Warta river, Poland / J. Jaskuła // Minerals. – 2021. – Vol. 11, № 3. – P. 327–347. – DOI: 10.3390/min11030327.
6. Позднякова, А. И. Тяжелые металлы в системе «донные отложения – водная растительность» речных экосистем в зоне наблюдения Белорусской атомной станции / А. И. Позднякова // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2020. – № 3. – С. 41–52.
7. Изучение содержания тяжелых металлов в донных отложениях и воде в отводящем канале рисовой оросительной системы / Т. И. Дровозова, Л. А. Булгакова, М. В. Власов, Н. Н. Красовская // Мелиорация и гидротехника. – 2024. – Т. 14, № 4. – С. 155–170.
8. Лукашев, О. В. Закономерности аккумуляции металлов в современных донных отложениях р. Свислочь / О. В. Лукашев // Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий : материалы III Междунар. науч. конф., г. Минск, 15 дек. 2021 г. – Минск : БГУ, 2021. – С. 238–267.
9. Особенности загрязнения донных отложений малых рек тяжелыми металлами в результате различной хозяйственной деятельности / Б. И. Корженевский, Г. Ю. Толкачев, Н. В. Коломийцев, Т. И. Ильина // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – Т. 63, № 3. – С. 415–426.

10. Рябова, Л. Н. Критерий оценки экологического состояния донных отложений (на примере Брестской области) / Л. Н. Рябова, И. А. Залыгина // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2018. – Т. 54, № 4. – С. 455–466. – DOI: 10.29235/1561-8331-2018-54-4-455-466.
11. Overview assessment of risk evaluation and treatment technologies for heavy metal pollution of water and soil / Z. Wang, P. Luo, X. Zha [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 379. – P. 134043–134063. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134043.
12. A critical review on chemical analysis of heavy metal complexes in water/wastewater and the mechanism of treatment methods / Z. Xu, Q. Zhang, X. Li [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 429. – P. 131688–131708. – DOI: 10.1016/j.cej.2021.131688.
13. Информационная система «Экологический Портал Республики Беларусь» : [сайт]. – Минск, 2024–2025. – URL: <https://ecportal.gov.by> (дата обращения: 09.03.2025).
14. Макаревич, А. А. Антропогенные гидрологические преобразования рек г. Минска / А. А. Макаревич // Вестник Белорусского государственного университета. – 2001. – С. 62–67.
15. Лихачева, А. В. Химия окружающей среды. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие для студ. / А. В. Лихачева, Л. А. Шибка. – Минск : БГТУ, 2011. – 204 с.
16. Qu K. Environmental Analytical Chemistry / K. Qu, D. Dan. – Amsterdam : Elsevier, 2023. – 230 p.
17. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River / G. Muller // Geojournal. – 1969. – Vol. 2. – P. 108–118.
18. Variation of humic substances within peat profile / H. Anderson, A. Hepburn // Peat and Water. – 1986. – Vol. 2. – P. 177–194.
19. Chukanov, N. V. Infrared spectroscopy of minerals and related compounds / N. V. Chukanov, A. D. Chervonnyi. – Cham : Springer, 2016. – 1109 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-25349-7.

References

1. *Minskij oblastnoj komitet prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchej sredy* [Minsk regional committee of natural resources and environmental protection]. Available at: <https://minoblpiroda.gov.by/> (accessed 04 March 2025). (in Russian)
2. *Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'* [National Statistical Book of the Republic of Belarus]. Available at: <https://www.belstat.gov.by/> (accessed 04 March 2025). (in Russian)
3. *Glavnyj informacionno-analiticheskij centr Nacional'noj sistemy monitoringa okruzhayushchej sredy v Respublike Belarus'* [The main information and analytical center of the National System for Environmental Monitoring in the Republic of Belarus]. Available at: <https://www.nsmos.by/> (accessed 04 March 2025). (in Russian)
4. Bajkov V. N., Kurochkina V. A., Pisarev D. V. *Rechnaya gidravlika i svoystva ruslovykh otlozhenij na urbanizirovannykh territoriyah* [River hydraulics and properties of cretaceous deposits in urbanized areas]. *Vestnik Mogilyovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta = Bulletin of Mogilev State University of Civil Engineering*, 2011, no. 2, pp. 221–227. (in Russian)
5. Jaskuła J. Analysis of spatial variability of river bottom sediment pollution with heavy metals and assessment of potential ecological hazard for the Warta river, Poland. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 327–347, DOI: 10.3390/min11030327.
6. Pozdnyakova A. I. *Tyazhelye metally v sisteme 'donye otlozheniya – vodnaya rastitel'nost' rechnyh ekosistem v zone nablyudeniya Belorusskoj atomnoj stancii* [Heavy metals in the system of 'bottom sediments – aquatic vegetation' of river ecosystems in the observation zone of the Belarusian nuclear power plant]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya = Journal of the Belarusian State University. Ecology*, 2020, no. 3, pp. 41–52. (in Russian)
7. Drovovozova T. I. *Izuchenie sodержaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyah i vode v otvodyashchem kanale risovoj orositel'noj sistemy* [Study of heavy metals content in bottom sediments and water in draining channel of rice irrigation system]. *Melioraciya i gidrotehnika = Melioration and hydraulic engineering*, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 155–170. (in Russian)
8. Lukashov O. V. *Zakonomernosti akkumulyatsii metallov v sovremennykh donnykh otlozheniyah r. Svisloch'* [Patterns of metal accumulation in modern sediments in river Svisloch]. *Materialy III Mezhdunarod. nauch. konf. "Problemy regional'noj geologii zapada Vostochno-Evropejskoj platformy i smezhnykh territorij"* [Proc. of the III Int. conf. "Problems of the regional geology of the west of the East-European Platform and related topics"]. Minsk, 2021, pp. 238–267. (in Russian)
9. Korzhenevskij B. I. *Osobennosti zagryazneniya donnykh otlozhenij malych rek tyazhelymi metallami v rezul'tate razlichnoj hozyajstvennoj deyatel'nosti* [Features of heavy metal contamination of small rivers by various economic activities]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = Bulletin of the agrouniversity complex of the Low Volga region: science and higher professional education*, 2021, vol. 63, no. 3, pp. 415–426. (in Russian)
10. Ryabova L. N. *Kriterij ocenki ekologicheskogo sostoyaniya donnykh otlozhenij (na primere Brestskoj oblasti)* [Criteria for assessing the ecological status of sediment (as an example from the Brest region)]. *Vesti Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya himicheskikh nauk = Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of chemical sciences*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 455–466, DOI: 10.29235/1561-8331-2018-54-4-455-466. (in Russian)
11. Wang Z., Luo P., Zha X. Overview assessment of risk evaluation and treatment technologies for heavy metal pollution of water and soil. *J. of Cleaner Production*, 2022, vol. 379, pp. 134043–134063, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134043.

12. Xu Z., Zhang Q., Li X. A critical review on chemical analysis of heavy metal complexes in water/wastewater and the mechanism of treatment methods. *Chemical Engineering Journal*, 2022, vol. 429, pp. 131688–131708, DOI: 10.1016/j.cej.2021.131688.
13. *Informacionnaya sistema "Ekologicheskij Portal Respubliki Belarus"* [Information system "Ecological Portal of the Republic of Belarus"]. Available at: <https://ecoportal.gov.by/> (accessed 09 March 2025). (in Russian)
14. Makarevich A. A. *Antropogennye gidrologicheskie preobrazovaniya rek g. Minska* [Anthropogenic hydrological transformation of the rivers of Minsk]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Belarusian State University*, 2001, pp. 62–67. (in Russian)
15. Lihacheva A. V., Shibeka L. A. *Himiya okruzhayushchej sredy. Laboratornyj praktikum: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov* [Environmental chemistry. Laboratory workshop: teaching aid for students]. Minsk, 2011, 204 p. (in Russian)
16. Qu K. *Environmental Analytical Chemistry*. Amsterdam, Elsevier Publ., 2023, 230 p.
17. Muller G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, vol. 2, pp. 108–118.
18. Anderson, H. Variation of humic substances within peat profile. *Peat and Water*, 1986, vol. 2, pp. 177–194.
19. Chukanov N. V., Chervonnyi A. D. *Infrared spectroscopy of minerals and related compounds*. Cham, Springer Publ., 2016, 1109 p., DOI: 10.1007/978-3-319-25349-7.

Информация об авторах

Дорожка Елизавета Юрьевна – магистрант, младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: elizaveta2002belstu@gmail.com

Янута Юрий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией физико-химической механики природных дисперсных систем, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanuta@tut.by

Information about the authors

Elizaveta Yu. Dorozhko – Master's degree student, Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: elizaveta2002belstu@gmail.com

Yuriy G. Yanuta – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Deputy Director, Head of Lab. of physico-chemical mechanics of natural dispersed systems, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanuta@tut.by

КОМПОСТИРОВАНИЕ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД И ОРГАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Н. Ф. Терлецкая¹, А. С. Антонюк¹, А. Н. Гапонюк¹, А. И. Чухольский²

¹Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси, Брест, Беларусь;

²Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье представлены результаты изучения параметров процесса компостирования ОСВ с ОТКО (температуры, влажности, плотности, соотношения углерода и азота, содержания органического вещества, кислотности, общего азота, общего фосфора и общего калия) и состава полученного компоста.

Показатели температуры и влажности в бурте из ОСВ и ОТКО соответствовали оптимальным условиям для жизнедеятельности аэробных микроорганизмов, принимающих участие в компостировании.

В процессе созревания компоста отмечалось увеличение плотности компостируемой смеси и уменьшение в ней соотношения углерода и азота. Также в процессе биологического окисления в компостируемой массе снижалась концентрация органического вещества и увеличивалось содержание питательных элементов.

В результате компостирования ОСВ с ОТКО получен компост, пригодный для использования в качестве органического удобрения под посадки лесохозяйственных культур вдоль дорог, в лесных и декоративных питомниках, цветоводстве, озеленении, при рекультивации нарушенных земель.

Ключевые слова: компостирование; осадки сточных вод; органическая часть твердых коммунальных отходов; компост; температура; влажность; соотношение углерода и азота; органическое вещество; кислотность; общий азот; общий фосфор; общий калий.

Для цитирования. Терлецкая Н. Ф., Антонюк А. С., Гапонюк А. Н., Чухольский А. И. Компостирование осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 100–109.

COMPOSTING OF SEWAGE SLUDGE AND ORGANIC PART OF MUNICIPAL SOLID WASTE

N. F. Tsarletskaia¹, A. S. Antoniuk¹, A. N. Gaponiuk¹, A. I. Chukhol'ski²

¹The Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus, Brest, Belarus;

²Institute of Housing and Communal Services of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The article presents the results of studying the parameters of the process of composting sewage sludge with the OPMW (temperature, humidity, density, carbon to nitrogen ratio, organic matter content, acidity, total nitrogen, total phosphorus and total potassium) and the composition of the resulting compost.

The temperature and humidity indicators in the pile of urban SS and the OPMW corresponded to the optimal conditions for the vital activity of aerobic microorganisms participating in composting.

During the maturation of the compost, an increase in the density of the composted mixture and a decrease in the carbon to nitrogen ratio were observed. Also, during the process of biological oxidation in the composted mass, the concentration of organic matter decreased and the content of nutritional elements increased.

As a result of composting sewage sludge with the OPMW, compost was obtained that is suitable for use as an organic fertilizer for planting forestry crops along roads, in forest and ornamental nurseries, floriculture, landscaping, and in the reclamation of disturbed lands.

Keywords: composting; sewage sludge; organic part of municipal solid waste; compost; temperature; moisture; carbon to nitrogen ratio; organic matter; acidity; total nitrogen; total phosphorus; total potassium.

For citation. Tsarletskaia N. F., Antoniuk A. S., Gaponiuk A. N., Chukhol'ski A. I. Composting of sewage sludge and organic part of municipal solid waste. *Nature Management*, 2025, no. 1, p. 100–109.

Введение. В настоящее время существует широкий спектр различных технологий переработки осадков сточных вод (ОСВ). Одним из наиболее перспективных методов биологической стабилизации органических отходов является компостирование [1]. В результате данного процесса получают

гумифицированный и обеззараженный сыпучий продукт, который может непосредственно использоваться как органическое удобрение, либо применяться в качестве компонента при производстве почвогрунтов.

Для получения качественных компостов с определенным соотношением углерода и азота, пористой структурой и необходимой влажностью применяют различные наполнители, в частности органическую часть твердых коммунальных отходов (ОТКО). В настоящее время компостирование ОТКО, согласно Национальной стратегии по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами, а также введенному в 2020 г. ТКП 17.11-08-2020 (33040/33140), регламентирующему раздельный сбор и сортировку различных видов отходов, является одной из актуальных задач в сфере обращения с коммунальными отходами в Республике Беларусь.

По литературным данным, совместно с ОСВ компостируют древесные опилки [2–6], древесную щепу [7, 8], древесную кору [9], лиственный опад [10] и солому [11]. Полученные компосты могут быть использованы в сельском и лесном хозяйстве, цветоводстве, при благоустройстве городских территорий, рекультивации нарушенных земель и откосов автомобильных дорог, полигонов твердых коммунальных отходов и др.

Цель работы – изучить параметры процесса компостирования ОСВ и ОТКО, а также состав полученного компоста.

Материалы и методы исследования. Компост был заложен в филиале «Витебскводоканал» УП «Витебскоблводоканал» на открытой площадке для компостирования с асфальтобетонным покрытием. Для закладки компоста использовали следующие компоненты:

- ОСВ с иловых площадок УП «Витебскоблводоканал» после естественного подсушивания. Агрохимический состав ОСВ: содержание органического вещества 59,5 %, общего азота – 3,6, общего фосфора – 2,0, общего калия – 0,4 %, кислотность – 7,7 ед. рН;

- древесные опилки после сортировки и измельчения древесных отходов. Опилки добавляют в компост к ОСВ для оптимизации соотношения углерода к азоту [6], а также в целях выполнения функции регулятора режима влажности органических удобрений [11]. Данные древесные отходы без дополнительных затрат на измельчение имеют небольшой размер частиц, что положительно сказывается на интенсивности разложения древесного материала за счет увеличения удельной площади поверхности. Применение компостов на основе ОСВ и опилок улучшает структуру почвы, снижая ее плотность [12];

- трава и листва после уборки городских территорий. Состав фракций растительных отходов может существенно отличаться, что определяется различными факторами, в частности видом и возрастом растений, средой произрастания. Свежее зеленое сырье содержит большое количество водорастворимых веществ, белков и солей. Сено в среднем содержит 14–17 % воды, 7–10 % протеина, 1,5–3 % жира, 38–42 % безазотистых экстрактивных веществ, 22–28 % клетчатки, 5–8 % золы [13]. Структура и состав листового опада зависят от места и времени сбора, климатических условий. Внесение субстрата из листового опада улучшает структуру почвы, что создает благоприятные условия для развития растений [14].

Сформированный бурт из ОСВ и ОТКО при закладке имел следующие размеры: высоту 2,2 м, ширину 3,7 м, длину 15,0 м.

Анализ проб компостируемой массы по комплексу агрохимических показателей выполняли по стандартным методикам: $\text{pH}_{\text{КСЛ}}$ – ГОСТ 27979-88, содержание влаги и сухого остатка – ГОСТ 26713-91, содержание органического вещества и золы – ГОСТ 27980-88, общего азота – ГОСТ 26715-85, общего фосфора – ГОСТ 26717-85, общего калия – ГОСТ 26718-85.

Определение валового содержания тяжелых металлов проводили согласно ГОСТ ISO 22036-2014. Пробоподготовку осуществляли согласно п. 9.7.3 МВИ. МН 3369-2010 «Методика выполнения измерений содержания металлов в жидких и твердых матрицах методом атомной абсорбционной спектроскопии».

Результаты и их обсуждение. Температура в бурте из ОСВ и ОТКО. Температура является одним из основных показателей процесса компостирования [15]. Данный параметр существенно меняется в ходе компостирования за счет теплового эффекта, появляющегося в результате окислительной деструкции ковалентных связей у разлагаемых веществ [16]. Условно принято разделять процесс на четыре температурные стадии: мезофильную (до 40 °С), термофильную (до 60 °С), остывания (до 40 °С) и созревания (до разницы не более 10 °С между средней температурой компостной массы и температурой окружающей среды) [17].

Сразу после закладки компоста начинается мезофильная стадия продолжительностью несколько дней. Численность популяции микроорганизмов быстро увеличивается за счет разложения сначала растворимых и легко деградируемых веществ – простых сахаров и углеводов, затем более сложных – целлюлозы, гемицеллюлозы и белков [18].

Через неделю после закладки температура в бурте составила 49,6 °С, что является индикатором наступления термофильной стадии. В данной фазе происходит ускоренный распад белков, жиров, сложных углеводов [18] и лигнина [16]. Температурный диапазон в термофильной стадии компо-

стирования составил 42,3–58,8 °С, при сильном саморазогреве компоста до температур выше оптимальных для умеренно термофильных микроорганизмов – 64,6 и 65,2 °С. Для отвода тепла проводят аэрацию бурта путем его перемешивания. При ворошении происходит лучшее смешивание наполнителя и ОСВ, биомасса компоста обогащается кислородом, из компоста удаляются продукты метаболизма аэробных микроорганизмов (вода и углекислый газ) [19, 20].

Остывание компоста происходит в результате снижения концентрации легкоразлагаемых веществ, затухания обменных процессов и снижения температуры [15, 18, 21]. В фазу созревания компоста температура в бурте находилась в диапазоне 34,6–15,6 °С и зависела от температуры окружающей среды.

Влажность компостируемой массы. Эффективное компостирование может быть достигнуто за счет обеспечения оптимальных условий для микроорганизмов-деструкторов, использующих воду для транспортировки питательных веществ через клеточную мембрану. Согласно литературным данным, влажность от 45 до 60 % является оптимальной для процесса компостирования [22]. Установлено, что скорость биологических процессов уменьшается на 60 % при снижении влажности с 45 до 35 %, а при влажности 20 % процесс прекращается [23].

При влажности более 70 % в значительной степени тормозится или полностью подавляется активность микроорганизмов. Гравитационная влага, вытесняя воздух, заполняет пустоты между частицами органического вещества, в результате чего из-за дефицита кислорода создаются анаэробные условия, приводящие к снижению температуры компостируемой массы и увеличению сроков компостирования [24].

Влажность компостной массы в период компостирования составляла 47,02–58,76 %. Оптимальную влажность в компосте поддерживали за счет полива бурта по мере необходимости.

Плотность компостируемой массы. Насыпная плотность массы в начале компостирования составила 295,2 кг/м³. По мере минерализации и гумификации компоста данный показатель постепенно увеличивался и в конце процесса компостирования составил 751,4 кг/м³ (рис. 1).

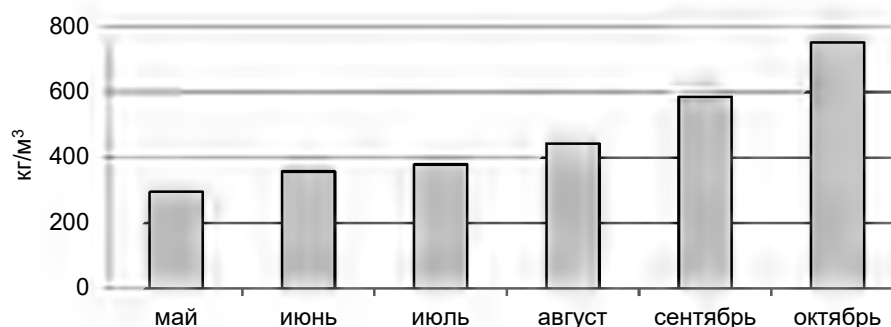


Рис. 1. Изменение плотности компостируемой массы из осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов

Fig. 1. Change in the density of compostable mass from wastewater sludge and the organic part of municipal solid waste

Возрастание плотности компоста к концу опыта относительно исходной подтверждается и литературными данными: в процессе компостирования при распаде органического вещества происходит диспергирование материала и его плотность увеличивается [25]. Плотность зрелого компоста оптимального фракционного состава обычно составляет свыше 600 кг/м³ [26].

Соотношение углерода к азоту в компостируемой массе. Одним из важных параметров, влияющих на ход микробиологических процессов при компостировании, является соотношение углерода и азота (C : N) в исходном субстрате [17, 25, 27].

Оптимальным C : N для жизнедеятельности микроорганизмов и, следовательно, эффективного процесса компостирования, является 25 : 1. Если компостируемый субстрат имеет C : N меньше 25, то он разлагается очень быстро, при этом происходит потеря азота в виде аммиака. При распаде субстратов, имеющих соотношение C : N больше 25, трансформация идет медленно, так как процесс лимитируется низким содержанием азота [25].

В связи с этим ОСВ с низким соотношением C : N целесообразно компостировать с ОТКО с высоким содержанием углерода: древесными опилками, стружкой, растительными остатками, листвой и др. Совместное компостирование богатых азотом ОСВ и богатых углеродом лигноцеллюлозных отходов позволяет не только уменьшить запах и стабилизировать органическое вещество ОСВ, но и увеличить концентрацию гуминовых веществ в получаемом удобрении [25].

В процессе компостирования интенсивно разлагаются в первую очередь углеродсодержащие соединения, такие как целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин, смола, воск и жиры, составляющие основную массу древесных остатков. В результате количество углерода снижается быстрее, чем азотистых

соединений, что и приводит к уменьшению соотношения С : N [28–31]. По мнению ряда авторов, характеристикой зрелого компоста является значение С : N равное 8–15 [16, 30, 32].

В ходе компостирования смеси ОСВ с ОТКО соотношение С : N в первые два месяца уменьшилось до 20, еще через такой же период времени – до 14 и в конце компостирования составило 9,1, что является одним из показателей готовности компоста.

Кислотность компостируемой массы. Изменение значений показателя pH компостов является результатом химико-микробиологических преобразований органических соединений и определяется балансом органических кислот, аммиака и углекислоты [33, 34].

Согласно литературным данным, значение pH компостируемой смеси в термофильной стадии становится щелочным за счет выделения аммиака при распаде белков [16, 18, 32]. Аммиак, который образуется при окислении органических веществ, довольно быстро окисляется в азотистую, а затем в азотную кислоту, происходит процесс нитрификации [32, 34] и отмечается снижение щелочности компоста [35].

Полученные нами результаты исследований согласуются с литературными данными: в процессе компостирования отмечалось сначала повышение pH в бурте от 7,4 до 7,6 ед., а затем снижение до 6,9 ед. (рис. 2).

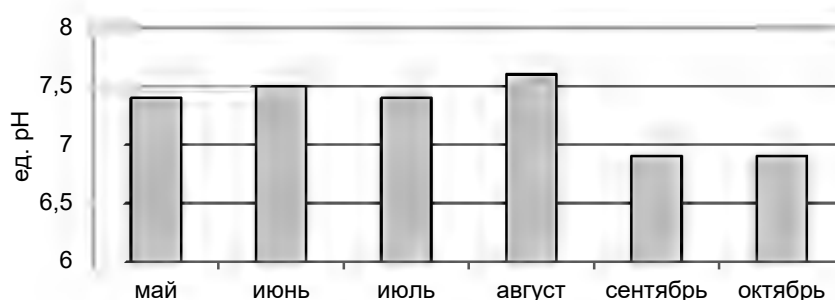


Рис. 2. Кислотность компостируемой массы из осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов

Fig. 2. Acidity of composted mass from sewage sludge and the organic part of municipal solid waste

Содержание органического вещества и питательных элементов в компостируемой массе. В ходе биотермического процесса происходит снижение содержания органического вещества в компостируемой массе на 15–30 %, а иногда и 40 %, в зависимости от состава компонентов, продолжительности и условий компостирования [25, 34, 36–38]. В исследованиях П. А. Курынцева [2] максимальное снижение содержания органического вещества в компостах составило 59 % за 90 сут, минимальное – 10 %.

В процессе компостирования ОСВ с ОТКО содержание органического вещества уменьшилось с 45,5 до 31,4 % (рис. 3).

Согласно литературным данным, при компостировании органических отходов в компосте увеличивается доля общего азота [2, 32, 35]. Результаты исследований О. Г. Красноберской соавт. показали [25], что в течение эксперимента содержание общего азота в компосте возросло на 10,0–29,9 % относительно исходного.

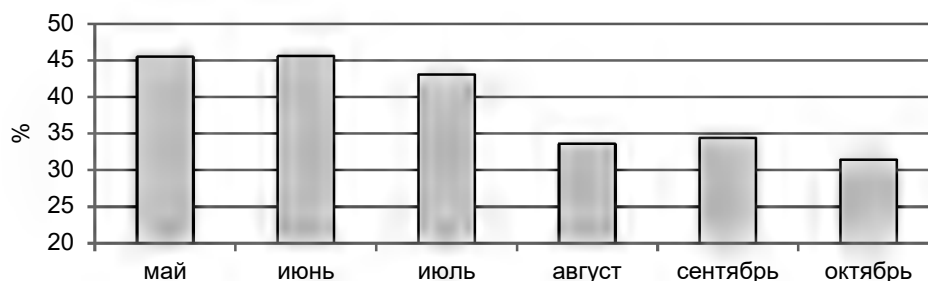


Рис. 3. Содержание органического вещества в компостируемой массе из осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов

Fig. 3. Organic matter content in compostable mass from sewage sludge and the organic part of municipal solid waste

В опыте В. В. Миронова с соавт. [32] при компостировании ОСВ наблюдалось увеличение содержания общего азота с 1,5 до 2,3 %, т. е. на 53,3 %.

В результате исследований Д. А. Антоненко [35] установлено, что за три месяца компостирования содержание общего азота в компосте увеличилось на 4–15 %, за пять месяцев – на 15–48 %.

В то же время в работе В. В. Копыткова с соавт. [38] отмечается, что содержание общего азота в субстратах после компостирования в течение месяца уменьшилось в 1,5 раза, в дальнейшем происходило постепенное его накопление до исходного уровня.

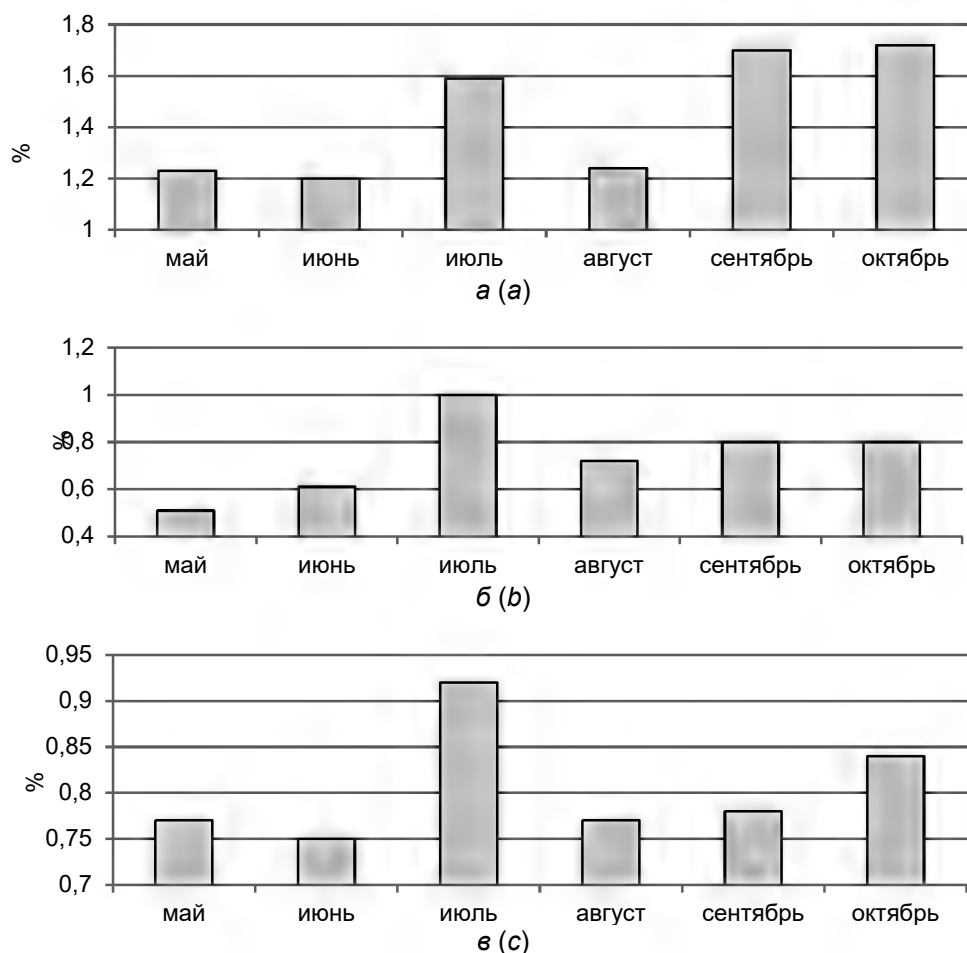


Рис. 4. Содержание общего азота (а), общего фосфора (б) и общего калия (в) в компостируемой массе из осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов

Fig. 4. Total nitrogen (a), total phosphorus (b), and total potassium (c) contents in composted mass from sewage sludge and the organic part of municipal solid waste

В результате проведенных нами исследований установлено, что при компостировании ОСВ с ОТКО содержание общего азота увеличилось с 1,23 до 1,72 %, что на 39,8 % больше исходной величины (рис. 4, а).

Согласно литературным данным, содержание общего фосфора при компостировании возрастает на 9,9–22,5 % относительно исходных данных [25]. Результаты исследований И. Н. Барановского и Т. И. Смирновой показали, что за три месяца компостирования содержание общего фосфора в компосте из ОСВ и опилок возросло с 0,82 до 0,91 % [6]. Нами установлено, что в процессе компостирования ОСВ и ОТКО содержание общего фосфора увеличилось с 0,51 до 0,80 % (рис. 4, б).

Содержание общего калия в смеси ОСВ с ОТКО в процессе компостирования варьировало в интервале 0,75–0,92 % (рис. 4, в).

Санитарно-гигиенические показатели компоста из ОСВ и ОТКО. Одним из основных факторов, лимитирующих применение ОСВ и компостов на их основе в качестве удобрений или компонентов плодородного грунта при озеленении, является наличие в них загрязняющих веществ, в том числе тяжелых металлов и патогенных микроорганизмов, в связи с чем при использовании данных отходов, обязательна оценка полученной продукции на соответствие требованиям безопасности.

Токсиколого-гигиенические исследования показали, что полученный компост относится к малоопасным соединениям (четвертый класс опасности). Валовое содержание химических элементов в данном компосте, мг/кг сухого вещества: свинец – 9,24, кадмий – 0,55, цинк – 113,0, медь – 137, никель – 8,04, хром – 35,0, мышьяк – 0,31, ртуть – ниже предела обнаружения (нижняя граница диапазона измерений составляет 0,06 мг/кг). В соответствии с требованиями СТБ 26680-2024 полученный компост может применяться в качестве органического удобрения под посадки лесохозяйственных культур вдоль дорог, в лесных и декоративных питомниках, цветоводстве, озеленении, а также при рекультивации.

Заключение. В результате компостирования ОСВ и ОТКО получен компост, который в соответствии с требованиями СТБ 2668-2024 «Органические удобрения, почвогрунты и субстраты для рекультивации с использованием осадков сточных вод» может применяться в качестве органического удобрения под посадки лесохозяйственных культур вдоль дорог, в лесных и декоративных питомниках, цветоводстве, озеленении, при рекультивации нарушенных земель.

Проведенные исследования продемонстрировали перспективность совместного компостирования ОСВ и ОТКО как эффективного и экологически безопасного метода их переработки, что, с одной стороны, позволяет утилизировать данные отходы, а с другой – получать ценное органическое удобрение.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории биогеохимии, а также лаборатории гидроэкологии и экотехнологий Полесского аграрно-экологического института НАН Беларуси за проведение аналитических исследований по оценке агрохимического состава и содержания химических элементов в компостируемой массе и полученном компосте.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the staff of the laboratory of biogeochemistry, as well as the laboratory of hydroecology and ecotechnology of the Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus for conducting analytical studies to assess the agrochemical composition and content of chemical elements in the composted mass and the resulting compost.

Список использованных источников

1. Научно-аналитический обзор использования твердых отходов водоочистных сооружений: мировые тенденции, зарубежный опыт и возможности его применения на территории Российской Федерации / Л. М. Титова, А. Х. Нугманов, М. А. Никулина, М. Ш. Арабов // Вода: химия и экология. – 2019. – № 10–12. – С. 154–161.
2. Курынцева, П. А. Совместная переработка органических промышленных, муниципальных и сельскохозяйственных отходов методами анаэробного сбраживания и компостирования : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / Курынцева Полина Алексеевна ; Ин-т экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального ун-та. – Н. Новгород, 2016. – 25 с.
3. Копылов, К. А. Утилизация органических отходов в зеленом строительстве: экологические, технологические и управленческие аспекты : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : 03.00.16 / Копылов Константин Александрович; Марийский гос. техн. ун-т. – Йошкар-Ола, 2007. – 23 с.
4. Патент № 2412584 С1 РФ, МПК A01G 1/00. Смесь семян для создания газонов с использованием компостов на основе осадков сточных вод : № 2009124363/21 : заявлено 25.06.2009 : опубл. 27.02.2011 / Романов Е. М., Мухортов Д. И., Средин А. Д. ; заявитель Марийский гос. техн. ун-т. – 7 с.
5. Патент № 2498969 С2 РФ, МПК C05F 15/00. Нетрадиционное органическое удобрение : № 2012105997/13 : заявлено 20.02.2012 : опубл. 20.11.2013 / Бахтина Н. К., Мухортов Д. И., Малюта О. В., Романов Е. М. ; заявитель Марийский гос. техн. ун-т. – 6 с.
6. Патент № 2513558 С1 РФ, МПК C05F 7/00. Способ приготовления компоста из осадка сточных вод (варианты) : № 2013101062/13 : заявлено 09.01.2013 : опубл. 20.04.2014 / Барановский И. Н., Смирнова Т. И. ; заявитель Тверская гос. с.-х академия, ТверьВодоканал. – 9 с.
7. Патент № 2414444 С2 РФ, МПК C05F 7/00, C05F 9/00. Способ совместного компостирования отходов городского хозяйства (варианты) : № 2009118813/21 : заявлено 19.05.2009 : опубл. 20.03.2011 / Луканин А. В., Мартыанов А. А., Тарасова Е. В., Лаврушина Ю. Г., Сахарова А. И. ; заявитель Медбиопром. – 8 с.
8. Гунина, Е. А. Агроэкологическая оценка осадков сточных вод очистных сооружений Южное Бутово г. Москвы для применения в агрикультуре : дис. ... канд. биол. наук : 06.01.04 / Гунина Евгения Александровна ; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – М., 2017. – 142 л.
9. Патент № 2647929 С2 РФ, МПК C05F 11/00, C05F 7/02, C05F 3/00. Способ переработки древесной коры : № 2016126653 : заявлено. 01.07.2016 : опубл. 21.03.2018 / Гаврилов Т. А. ; заявитель Петрозаводский гос. ун-т. – 8 с.
10. Лесина, М. Л. Изучение процессов компостирования отходов при получении биоудобрения / М. Л. Лесина // III Междунар. эколог. форум : сб. материалов, Кемерово, 6–8 окт. 2015 г. / Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2015. – С. 46–50.

11. Патент № 2514221 С1 РФ, МПК C05F 3/00. Способ получения органоминерального удобрения из осадка сточных вод с помощью компостирования : № 2012137952/13 : заявлено 06.09.2012 : опубл. 27.04.2014 / Каштанов И. А. ; заявители: Каштанов И. А., Бутусов И. В., Бондарь Д. В. – 5 с.
12. Долматов, С. Н. Перспективы применения компоста из древесных опилок / С. Н. Долматов // Аграрный научный журнал. – 2010. – № 3. – С. 49–51.
13. Получение органических удобрений из отходов городских зеленых насаждений / Р. Н. Алиев, З. К. Маймеков, К. Т. Баканов, С. Т. Чериков // Новости науки Казахстана. – 2020. – № 3 (145). – С. 188–206.
14. Патент № 2619979 С РФ, МПК C05F 9/00. Способ приготовления органического удобрения на основе листового опада : № 2015156998 : заявлено 29.12.2015 : опубл. 22.05.2017 / Бекузарова С. А., Цопанова Е. И., Бестаев Г. В. ; заявитель Северо-Осетинский гос. ун-т им. К. Л. Хетагурова. – 5 с.
15. Гаврилов, М. М. Выбор оптимального и актуального для сельского хозяйства метода переработки осадков сточных вод / М. М. Гаврилов, А. А. Пименов, П. Е. Красников // Природообустройство. – 2017. – № 5. – С. 63–69.
16. Фарберова, Е. А. Получение органо-минерального удобрения на основе компоста из растительного сырья / Е. А. Фарберова, А. В. Лапицкая // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2012. – С. 156–168.
17. Состав микробного сообщества на разных стадиях компостирования, перспектива получения компоста из муниципальных органических отходов (обзор) / А. Н. Ножевникова, В. В. Миронов, Е. А. Бочкова [и др.] // Прикладная биохимия и микробиология. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 211–221. – DOI: 10.1134/S0555109919030103.
18. Компостирование осадков сточных вод: теоретические и практические аспекты. Часть 1 / С. Д. Беляева, Е. В. Короткова, М. И. Петров, М. А. Беляев // Экология производства. – 2022. – № 2 (211). – С. 88–90.
19. Аганичева, Е. К. Компостирование осадков городских сточных вод / Е. К. Аганичева, Г. Т. Амбросова // Экология. Риск. Безопасность : материалы Всерос. науч.-практ. конф., Курган, 29–30 окт. 2020 г. / Курганский гос. ун-т. – Курган, 2020. – С. 17–20.
20. К вопросу разработки технологии ускоренного приготовления органических компостов с использованием аэратора-смесителя АСК-4,5 / Т. М. Серая, Е. Н. Богатырева, Л. Я. Степук, А. А. Лях // Земляробства і ахова раслін. – 2012. – № 1. – С. 18–21.
21. Федорова, М. Н. Агроэкологическое обоснование применения компоста на основе осадка сточных вод кожевенного производства при выращивании озимой пшеницы : автореф. дис. ... канд. с.-х наук : 03.00.16 / Федорова Мария Николаевна ; Рязанская гос. с.-х. академия им. проф. П. А. Костычева. – М., 2007. – 25 с.
22. Перспективные источники нетрадиционного органического удобрения – осадки сточных вод / Э. Нағызбекқызы, С. С. Айнур, Г. А. Данлыбаева [и др.] // Астанинский медицинский журнал. – 2021. – № 2 (108). – С. 1–8.
23. Дегтерева, М. С. Методы контроля влажности при биотермическом компостировании органических отходов / М. С. Дегтерева, А. В. Васильев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 4 (5). – С. 970–973.
24. Рожко, А. А. Переработка древесно-растительных остатков компостированием в условиях Подмосквья, влияние компоста на рост сеянцев сосны обыкновенной : автореф. дис. ... канд. с.-х наук : 06.03.01 / Рожко Александр Александрович ; Моск. гос. ун-т леса. – М., 2009. – 23 с.
25. Красноберская, О. Г. Влияние вида целлюлозосодержащего и влагопоглощающего связующего материала на процесс компостирования навозосодержащих смесей / О. Г. Красноберская, Е. Н. Сосновская, Е. С. Стельмах // Природопользование. – 2021. – № 2. – С. 139–145. – DOI: 10.47612/2079-3928-2021-2-139-145.
26. Соломина, О. И. Технология утилизации древесно-растительных отходов городской среды для рекультивации земель : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02 / Соломина Оксана Игоревна ; Моск. гос. ун-т природообустройства. – М., 2004. – 24 с.
27. Седых, А. А. К вопросу соотношения углерода к азоту в компостной смеси при планировании экспериментов / А. А. Седых, В. В. Миронов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2016. – № 4 (24). – С. 147–150.
28. Изготовление компоста из растительных отходов / сост.: Е. Л. Имранова, О. А. Кириенко. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2010. – 17 с.
29. Живихина, К. М. Оценка смеси осадков сточных вод с фосфогипсом и опилками / К. М. Живихина // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2013. – Т. 9, № 2. – С. 89–90.
30. Селивановская, С. Ю. Влияние биологических добавок на процесс компостирования органической фракции твердых бытовых отходов и удобрительные свойства компостов / С. Ю. Селивановская, С. А. Ярлыченко, В. З. Латыпова // Агрохимия. – 2007. – № 8. – С. 58–63.
31. Пашкевич, Е. Б. Оценка скорости компостирования опилок бука (*Fagus sylvatica* L.) и сосны (*Pinus sylvestris* L.) с соевой мелассой и влияние их на урожай ячменя (*Hordeum vulgare* L.) / Е. Б. Пашкевич, А. И. Почтенная, М. В. Парахина // Проблемы агрохимии и экологии. – 2021. – № 1. – С. 20–26. – DOI: 10.24412/2227-9407-2024-4-50-61.
32. Динамика биологических процессов при компостировании анаэробно обработанного осадка сточных вод / В. В. Миронов, Е. А. Бочкова, А. В. Ганнесен [и др.] // Микробиология. – 2020. – Т. 89, № 4. – С. 474–487. – DOI: 10.31857/S0026365620040096.
33. Скрыльник, Е. В. Трансформация органического вещества осадков сточных вод в процессе биоконверсии / Е. В. Скрыльник, В. А. Гетманенко // Почвоведение и агрохимия. – 2015. – № 1 (54). – С. 172–179.
34. Криволапов, И. П. Анализ биохимических процессов при компостировании / И. П. Криволапов // Вестник МичГАУ. – 2010. – № 1. – С. 65–68.
35. Антоненко, Д. А. Особенности использования растительных остатков для получения компостов / Д. А. Антоненко // Научный журнал КубГАУ. – 2017. – № 134 (10). – С. 1–12.

36. Чекаев, Н. П. Компосты из ОСВ и их влияние на агрофизические свойства чернозема / Н. П. Чекаев, Е. Н. Кузин // Плодородие. – 2007. – № 1. – С. 21–22.
37. Чекаев, Н. П. Изменение свойств чернозема выщелоченного под действием компостов из осадков сточных вод / Н. П. Чекаев // Нива Поволжья. – 2010. – № 1 (14). – С. 31–34.
38. Новые композиционные полимерные составы для лесовыращивания в природно-климатических условиях Беларуси и Казахстана / В. В. Копытков, В. С. Каверин, А. В. Боровков, В. Вл. Копытков. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 510 с.

References

1. Titova L. M., Nugmanov A. H., Nikulina M. A., Arabov M. Sh. *Nauchno-analiticheskiy obzor ispol'zovaniya tverdyh othodov vodoочистnykh sooruzhenij: mirovyie tendencii, zarubezhnyy opyt i vozmozhnosti ego primeneniya na territorii Rossijskoj Federacii* [Scientific and analytical review of the use of solid waste from water treatment plants: global trends, foreign experience and the possibilities of its application in the territory of the Russian Federation]. *Voda: himiya i ekologiya = Water: chemistry and ecology*, 2019, no.10–12, pp. 154–161. (in Russian)
2. Kurynceva P. A. *Sovmestnaya pererabotka organicheskikh promyshlennykh, municipal'nykh i sel'skohozyajstvennykh othodov metodami anaerobnogo sbrazhivaniya i kompostirovaniya* [Co-processing of organic industrial, municipal and agricultural waste using anaerobic digestion and composting methods. PhD biol. sci. abstract diss.]. Nizhny Novgorod, 2016, 25 p. (in Russian)
3. Kopylov K. A. *Utilizaciya organicheskikh othodov v zelenom stroitel'stve: ekologicheskie, tekhnologicheskie i upravlencheskie aspekty* [Recycling of organic waste in green construction: environmental, technological and management aspects. PhD agro. sci. abstract diss.]. Joshkar-Ola, 2007, 23 p. (in Russian)
4. Romanov E. M., Mukhortov D. I., Sredin A.D. *Smes' semyan dlya sozdaniya gazonov s ispol'zovaniem kompostov na osnove osadkov stochnykh vod* [Seed mix for creating lawns using composts based on sewage sludge]. Patent RF, no. 2412584, 2011.
5. Bahtina N. K., Mukhortov D. I., Malyuta O. V., Romanov E. M. *Netradicionnoe organicheskoe udobrenie* [Unconventional organic fertilizer]. Patent RF, no. 2498969, 2013. (in Russian)
6. Baranovskij I. N., Smirnova T. I. *Sposob prigotovleniya komposta iz osadka stochnykh vod (varianty)* [Method of preparing compost from sewage sludge (options)]. Patent RF, no. 2513558, 2014. (in Russian)
7. Lukanin A. V., Martianov A. A., Tarasova E. N. V., Lavrushina Yu. G., Sakharova A. I. *Sposob sovmestnogo kompostirovaniya othodov gorodskogo hozyajstva (varianty)* [Method of joint composting of municipal waste (options)]. Patent RF, no. 2414444, 2011.
8. Gunina E. A. *Agroekologicheskaya ocenka osadkov stochnykh vod ochistnykh sooruzhenij Yuzhnoe Butovo g. Moskvy dlya primeneniya v agrikul'ture* [Agroecological assessment of sewage sludge from the treatment facilities of Southern Butovo, Moscow for use in agriculture. Dr. biol. sci. diss.]. Moscow, 2017, 142 p. (in Russian)
9. Gavrilov T. A. *Sposob pererabotki drevesnoj kory* [Method of processing tree bark]. Patent RF, no. 2647929, 2018. (in Russian)
10. Lesina M. L. *Izuchenie processov kompostirovaniya othodov pri poluchenii bioudobreniya* [Study of waste composting processes for obtaining biofertilizer]. *III Mezhdunar. ekolog. forum* [III Int. Environmental Forum]. Kemerovo, 2015, pp. 46–50. (in Russian)
11. Kashtanov I. A. *Sposob polucheniya organomineral'nogo udobreniya iz osadkov stochnykh vod s pomoshch'yu kompostirovaniya* [Method for obtaining organomineral fertilizer from sewage sludge using composting]. Patent RF, no. 2514221, 2014. (in Russian)
12. Dolmatov S. N. *Perspektivy primeneniya komposta iz drevesnykh opilok* [Prospects for using wood sawdust compost]. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal = Agricultural Scientific Journal*, 2010, no 3, pp. 49–51. (in Russian)
13. Aliyev R. N., Maymekov Z. K., Bakanov K.T., Cherikov S. T. *Poluchenie organicheskikh udobrenij iz othodov gorodskih zelenykh nasazhdenij* [Obtaining organic fertilizers from waste from urban green spaces]. *Novosti nauki Kazakhstana = Science news of Kazakhstan*, 2020, no. 3 (145), pp. 188–206. (in Russian)
14. Bekuzarova S. A., Tsopanova E. I., Bestaev G. V. *Sposob prigotovleniya organicheskogo udobreniya na osnove listovogo opada* [Method of preparation of organic fertilizer based on leaf litter]. Patent RF, no. 2619979, 2017. (in Russian)
15. Gavrilov M. M., Pimenov A. A., Krasnikov P. E. *Vybor optimal'nogo i aktual'nogo dlya sel'skogo hozyajstva metoda pererabotki osadkov stochnykh vod* [Selection of an optimal and relevant method for processing sewage sludge for agriculture]. *Prirodoobustrojstvo*, 2017, no. 5, pp. 63–69. (in Russian)
16. Farberova E. A., Lapickaya A. V. *Poluchenie organo-mineral'nogo udobreniya na osnove komposta iz rastitel'nogo syr'ya* [Obtaining organo-mineral fertilizer based on compost from plant materials]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology*, 2012, pp. 156–168. (in Russian)
17. Nozhevnikova A. N., Mironov V. V., Bochkova E. A., Litty Yu. V., Russkova Yu. I. Composition of microbial community at different stages of composting, perspective of producing compost from municipal organic wastes (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 211–221. doi:10.1134/S0555109919030103. (in Russian)
18. Belyayeva S. D., Korotkova E. V., Petrov M. I., Belyayev M. A. *Kompostirovanie osadkov stochnykh vod: teoreticheskie i prakticheskie aspekty. Chast' 1* [Composting of sewage sludge: theoretical and practical aspects. Part 1]. *Ekologiya proizvodstva = Ecology of production*, 2022, no. 2 (211), pp. 88–90. (in Russian)

19. Aganicheva E. K., Ambrosova G. T. *Kompostirovanie osadkov gorodskih stochnykh vod* [Composting of municipal sewage sludge]. *Ekologiya. Risk. Bezopasnost' : materialy Vserossijskoj nauch.-pr. konf.* [Ecology. Risk. Safety: materials of the All-Russian scientific-practical conference]. Kurgan, 2020, pp. 17–20. (in Russian)
20. Seraya T. M., Bogatyreva Ye. N., Stepuk L. Ya., Lyakh A. A. *K voprosu razrabotki tekhnologii uskorenogo prigotovleniya organicheskikh kompostov s ispol'zovaniem aeratora-smesitelya ASK-4,5* [On the development of technology for accelerated preparation of organic composts using the ASC-4.5 aerator-mixer]. *Zemlyarobstva i ahova raslin = Agriculture and plant protection*, 2012, no. 1, pp. 18–21. (in Russian)
21. Fedorova M. N. *Agroekologicheskoe obosnovanie primeneniya komposta na osnove osadka stochnykh vod kozhevennogo proizvodstva pri vyrashchivanii ozimoy pshenicy* [Agroecological justification for the use of compost based on tannery wastewater sludge in growing winter wheat. PhD agro. sci. abstract diss.]. Moscow, 2007. 25 p. (in Russian)
22. Nagyzbekkyzy E., Ainur S. S., Danlybaeva G. A., Ayupova A. Zh., Khasanova E. Zh., Sembaeva D. Zh., Moldagulova A. K., Moldagulova N. B. *Perspektivnye istochniki netraditsionnogo organicheskogo udobreniya – osadki stochnykh vod* [Promising sources of non-traditional organic fertilizers – sewage sludge]. *Astaninskij medicinskij zhurnal = Astana Medical Journal*, 2021, no. 2 (108), pp. 1–8. (in Russian)
23. Degtereva M. S., Vasil'ev A. V. *Metody kontrolya vlazhnosti pri biotermicheskom kompostirovanii organicheskikh othodov* [Methods of moisture control in biothermal composting of organic waste]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk = Tidings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 4 (5), pp. 970–973. (in Russian)
24. Rozhko A. A. *Pererabotka drevesno-rastitel'nykh ostatkov kompostirovaniem v usloviyakh Podmoskov'ya, vliyaniye komposta na rost seyancev sosny obyknovЕННОj* [Processing of wood and plant residues by composting in the conditions of the Moscow region, the effect of compost on the growth of Scots pine seedlings. PhD agro. sci. abstract diss.]. Moscow, 2009. 23 p. (in Russian)
25. Krasnoberskaya O. G., Sosnovskaya E. N., Stel'mah E. S. *Vliyaniye vida tsellyulozosoderzhashchego i vlagopogloshchayushchego svyazuyushchego materiala na protsess kompostirovaniya navozosoderzhashchikh smesey* [The impact of a type of cellulose-containing and moisture-absorbing tying material on process of composting of manure-containing mixtures]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021, no. 2, pp. 139–145. – DOI: 10.47612/2079-3928-2021-2-139-145. (in Russian)
26. Solomina O. I. *Tekhnologiya utilizatsii drevesno-rastitel'nykh othodov gorodskoj sredy dlya rekul'tivatsii zemel'* [Technology of utilization of wood and plant waste of the urban environment for land reclamation. PhD techn. sci. abstract diss.]. Moscow, 2004. 24 p. (in Russian)
27. Sed'kh A. A., Mironov V. V. *K voprosu sootnosheniya ugleroda k azotu v kompostnoj smesi pri planirovanii eksperimentov* [On the issue of the carbon to nitrogen ratio in the compost mixture when planning experiments]. *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva = Bulletin of the All-Russian Research Institute of Livestock Mechanization*, 2016, no. 4 (24), pp. 147–150. (in Russian)
28. Imranova E. L., Kirienko O. A. *Izgotovlenie komposta iz rastitel'nykh othodov* [Making compost from plant waste]. Khabarovsk, Publishing house of Pacific state university, 2010, 17 p. (in Russian)
29. Zhivihina K. M. *Ocenka smesi osadkov stochnykh vod s fosfogipsom i opilkami* [Evaluation of a mixture of sewage sludge with phosphogypsum and sawdust]. *Ekologicheskij Vestnik Severnogo Kavkaza = Ecological Bulletin of the North Caucasus*, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 89–90. (in Russian)
30. Selivanovskaya S. Yu., Yarlychenko S. A., Latypova V. Z. *Vliyaniye biologicheskikh dobavok na process kompostirovaniya organicheskoy fraktsii tverdykh bytovykh othodov i udobritel'nye svoystva kompostov* [The influence of biological additives on the composting process of the organic fraction of solid municipal waste and the fertilizing properties of composts]. *Agrokhimiya = Agrochemistry*, 2007, no. 8, pp. 58–63. (in Russian)
31. Pashkevich E. B., Pochtennaya A. I., Parahina M. V. *Otsenka skorosti kompostirovaniya opilok buka (Fagus sylvatica L.) i sosny (Pinus sylvestris L.) s soevoy melassoy i vliyaniye ikh na urozhay yachmenya (Hordeum vulgare L.)* [Evaluation of the composting rate of beech (*Fagus sylvatica* L.) and pine (*Pinus sylvestris* L.) sawdust with soybean molasses and their effect on barley (*Hordeum vulgare* L.) yield]. *Problems of agrochemistry and ecology*, 2021, no. 1, pp. 20–26. – DOI: 10.24412/2227-9407-2024-4-50-61. (in Russian)
32. Mironov V. V., Bochkova E. A., Gannesen A. V., Vanteeva A. V., Russkova Yu. I., Nozhevnikova A. N. *Dinamika biologicheskikh processov pri kompostirovanii anaerobno obrabotannogo osadka stochnykh vod* [Dynamics of biological processes during composting of anaerobically treated sewage sludge]. *Microbiology*, 2020, vol. 89, no. 4, pp. 474–487. – DOI: 10.31857/S0026365620040096. (in Russian)
33. Skryl'nik E. V., Getmanenko V. A. *Transformatsiya organicheskogo veshchestva osadkov stochnykh vod v processe biokonversii* [Transformation of organic matter from sewage sludge in the process of bioconversion]. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil science and agrochemistry*, 2015, no. 1 (54), pp. 172–179. (in Russian)
34. Krivolapov I. P. *Analiz biohimicheskikh processov pri kompostirovanii* [Analysis of biochemical processes during composting]. *Vestnik MichGAU = MichGAU Bulletin*, 2010, no.1, pp. 65–68. (in Russian)
35. Antonenko D. A. *Osobennosti ispol'zovaniya rastitel'nykh ostatkov dlya polucheniya kompostov* [Features of using plant residues to obtain composts]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*, 2017, no. 134 (10), pp. 1–12. (in Russian)
36. Chekaev N. P., Kuzin E. N. *Komposty iz OSV i ih vliyaniye na agrofizicheskie svoystva chernozema* [Composts from sewage sludge and their influence on agrophysical properties of black soil]. *Plodorodie = Fertility*, 2007, no. 1, pp. 21–22. (in Russian)
37. Chekaev N. P. *Izmeneniye svoystv chernozema vyshchelochennogo pod dejstviem kompostov iz osadkov stochnykh vod* [Changes in the properties of leached chernozem under the influence of composts from sewage sludge]. *Niva Povolzh'ya*, 2010, no. 1 (14), pp. 31–34. (in Russian)

38. Kopytkov V. V., Kaverin V. S., Borovkov A. V., Kopytkov V. VI. *Novye kompozicionnye polimernye sostavy dlya lesovyrashchivaniya v prirodno-klimaticheskikh usloviyah Belarusi i Kazahstana* [New composite polymer compositions for forest cultivation in the natural and climatic conditions of Belarus and Kazakhstan]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014, 510 p. (in Russian)

Информация об авторах

Терлецкая Наталья Федоровна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, г. Брест, Беларусь). E-mail: klmvntsh@rambler.ru

Антонюк Александра Степановна – научный сотрудник, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, г. Брест, Беларусь). E-mail: ant_sash@rambler.ru

Гапонюк Андрей Николаевич – научный сотрудник, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, г. Брест, Беларусь). E-mail: andnik2017@yandex.ru

Чухольский Антон Игоревич – научный сотрудник, Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220084, г. Минск, Беларусь). E-mail: antonchuholskiy@gmail.com

Information about the authors

Natallia F. Tsarletskaia – Ph. D. (Biology), Senior Researcher, The Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus (41, Soviet Border Guards Str., 224030, Brest, Belarus). E-mail: klmvntsh@rambler.ru

Aleksandra S. Antoniuk – Researcher, The Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus (41 Soviet Border Guards Str., 224030, Brest, Belarus). E-mail: ant_sash@rambler.ru

Andrey N. Gaponiuk – Researcher, The Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus (41 Soviet Border Guards Str., 224030, Brest, Belarus). E-mail: andnik2017@yandex.ru

Anton I. Chukholski – Researcher, Institute of Housing and Communal Services of the NAS of Belarus (10 Academician Kuprevich Street, 220084, Minsk, Belarus). E-mail: antonchuholskiy@gmail.com

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ *GEOLOGY. MINERALS*

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-110-130>
УДК 556.38(476.7)

Поступила в редакцию 31.03.2025
Received 31.03.2025

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ВОДОСБОРОВ РЕК ЛЕСНАЯ И МУХАВЕЦ

В. Г. Жогло

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Выполнено геомиграционное моделирование изменения качественного состояния подземных вод на территории междуречья Лесная – Мухавец в зоне влияния водозаборов г. Бреста. По результатам моделирования составлены прогнозные карты загрязнения подземных вод грунтового, палеоген-среднечетвертичного и оксфорд-сеноманского водоносных комплексов (ВК) на период от 5 до 100 лет при естественном режиме фильтрации подземных вод и в условиях работы централизованных водозаборов г. Бреста.

Показано, что в течение прогнозного периода загрязнению подвергаются грунтовой, палеоген-среднечетвертичный и оксфорд-сеноманский ВК. Негативному воздействию не подвергается верхнепротерозойский-нижнекембрийский ВК, входящий в зону замедленного водообмена.

Водозаборы г. Бреста не оказали значимого влияния на масштабы загрязнения подземных вод грунтового и палеоген-среднечетвертичного ВК. Основные изменения связаны с эксплуатируемым оксфорд-сеноманским ВК. Отбор подземных вод из этого комплекса в объеме 221,7 тыс. м³/сут увеличивает напорные градиенты потока и, соответственно, скорости движения подземных вод. В течение 100 лет прогнозный фронт загрязнения от свиноводческого комплекса «Западный» может достичь линии водозабора «Западный».

Полученные результаты моделирования представляют интерес для обоснования мероприятий по управлению состоянием подземных вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец.

Ключевые слова: геофильтрация; геомиграционная модель; источники загрязнения; схематизация процесса миграции; водосборы рек Кшна, Лесная и Мухавец; водозаборы г. Бреста; прогноз качества подземных вод.

Для цитирования. Жогло В. Г. Прогноз изменения качества подземных вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 110–130.

FORECAST OF CHANGES IN UNDERGROUND WATERS QUALITY ON THE TERRITORY OF THE WATER CATCHMENT AREA OF THE LESNAYA AND THE MUHOVETS RIVERS

V. G. Zhoglo

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

Abstract. The geo-migration modelling of the change in underground waters quality on the territory of Lesnaya-Muhovets interfluvium in the zone of the water intake influence of Brest city has been done. According to the results of the modelling the forecast maps of the underground water pollution of ground, Paleogene-Middle Quaternary and Oxfordian-Cenomanian aquiferous water complexes (AWC) for the period from 5 up to 100 years during the natural regime of underground waters filtration and in the condition of the central water intake operation of Brest city have been created.

It has been established that temporary pollution migration in natural conditions is utterly slowly. The ground, Paleogene-Middle Quaternary and Oxfordian-Cenomanian AWC undergo to pollution during a forecasting period. Upper Proterozoic-Lower Cambrian AWC being in the zone of impaired water exchange does not undergo to a negative impact.

The water intakes of Brest city have not made a significant influence on the scopes of the underground waters pollution of the ground and Paleogene-Middle Quaternary AWC. The main changes connected to the exploited Oxfordian-Cenomanian AWC. Underground waters sampling from this complex in an amount of 221.7 thous. m³/day increases the pressure flow gradients and accordingly underground waters speed motion. During 100 years pollution forecast forefront from 'Zapadny' pig breeding complex can reach 'Zapadny' water intake line.

Obtained modelling results have interest for the grounding of arrangements management on underground waters condition on the territory of Lesnaya and Muhovets rivers water catchment area.

Keywords: geo-filtration; geo-migration model; pollution sources; migration process schematization; Kshna, Lesnaya and Muhovets rivers water catchment area; Brest city water intake; the forecast of underground waters quality.

For citation. Zhoglo V. G. Forecast of changes in underground waters quality on the territory of the water catchment area of the Lesnaya and the Muhovets rivers. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 110–130.

Введение. В настоящее время единственным надежным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения в Республике Беларусь остаются подземные воды (ПВ). Пресные ПВ имеют практически повсеместное распространение и по сравнению с поверхностными водами значительно лучше защищены от разнообразных источников загрязнения. При длительном отсутствии атмосферных осадков существование всех поверхностных водоисточников поддерживается за счет их питания ПВ. Таким образом, ПВ Республики Беларусь являются стратегически важным ресурсом, имеющим экологическую, социальную и экономическую значимость.

Хозяйственная деятельность человека сконцентрирована вокруг населенных пунктов, к ним привязаны как места жительства людей, так и значительная часть производственных мощностей. Исходя из чисто экономических соображений, вблизи городов и других поселений людей ведутся поиски, разведка и оборудование источников водоснабжения, размещаются отходы производства и потребления.

Соседство источников водоснабжения и мест хранения отходов, являющихся непрерывно действующим поставщиком загрязняющих веществ, обуславливает постоянную актуальность задачи прогноза изменения качественного состояния ПВ как во времени, так и в пространстве. Временной фактор важен в связи с тем, что поиски и разведка месторождений пресных ПВ, пригодных для хозяйственно-питьевого водоснабжения, строительство на их базе водозаборов, прокладка водопроводов и других инженерных сетей требуют значительных затрат времени. Оборудование новых водозаборов и инженерных сетей связано также с большими материальными затратами.

Процессы миграции загрязняющих веществ в ПВ протекают крайне медленно, поэтому краткосрочные прогнозы влияния источников загрязнения на качество 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 прогнозные оценки влияния водорастворимых загрязняющих веществ на качество ПВ. Особую актуальность имеют долгосрочные прогнозы изменения качественного состояния ПВ в связи с сохранением источников хозяйственно-питьевого водоснабжения для будущих поколений.

Повышенная сложность процессов миграции и 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 и развитостью математического обеспечения численных расчетов [1, с. 3]. Еще в 1980-е годы В. А. Мироненко, выдающийся российский (и советский) гидрогеолог, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, отмечал, что численное моделирование превратилось в своего рода символ передового научного подхода, в важнейший показатель качества проведенного исследования [2, с. 3]. Данное заключение профессора В. А. Мироненко не потеряло своей актуальности до настоящего времени. Тогда же В. А. Мироненко и В. Г. Румынин констатировали, 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 водоохранных 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» [3, с. 70].

Объект исследования – ПВ зон активного и замедленного водообмена на территории водосборов рек Лесная и Мухавец от уровня поверхности грунтовых вод (ГВ) до подошвы зоны трещиноватости кристаллического фундамента. Характеристика геологического строения и гидрогеологических условий водосборов рек Лесная и Мухавец применительно к цели нашего исследования дана в работе [4].

Цель работы – осуществить прогноз изменения качества ПВ, обусловленного воздействием реальных источников загрязнения на водосборах рек Лесная и Мухавец в зоне влияния водозаборов г. Бреста.

Основные задачи: 1) создание численной модели миграции ПВ в междуречье Западный Буг – Лесная – Мухавец; 2) долгосрочный прогноз изменения качества ПВ; 3) оценка проблем, затрудняющих надежный прогноз изменения качества ПВ на длительную перспективу.

Методический подход к обоснованию расчетных схем миграции загрязнений в подземных водах. Как отмечают авторы работы [3, с. 72–75], «...решающую роль при построении расчетных моделей миграции, на базе которых осуществляются гидрогеохимическое прогнозирование, планирование и интерпретация режимных наблюдений, играет миграционная схематизация процессов и условий массопереноса в водоносных комплексах (ВК). При этом можно выделить два этапа: 1) фильтрационная схематизация условий миграции и 2) схематизация процесса массопереноса (собственно миграционная схематизация). Ограниченность информации о фильтрационном поле является главной причиной, заставляющей проводить миграционную схематизацию на базе упрощенных моделей».

Основные аспекты миграционной схематизации сводятся к следующему [3, с. 75–76]: «1) схематизация влияния процессов массопереноса на расчетную схему фильтрации; 2) схематизация физико-химического взаимодействия ПВ с горными породами, а также физико-химических превращений, протекающих непосредственно в подземных растворах; 3) выявление относительной значимости отдельных механизмов конвективно-дисперсионного переноса; 4) обоснование целесообразных уровней рассмотрения миграционных процессов в гетерогенных ВК – с анализом возможностей сведения гетерогенных комплексов к квазигомогенным; 5) схематизация структуры миграционного потока; 6) схематизация граничных условий миграции; 7) схематизация развития миграционного процесса во времени. Схематизация влияния массопереноса на расчетную схему фильтрации должна исходить в первую очередь из оценки возможного влияния мигрирующих компонентов на плотность и в меньшей степени вязкость ПВ. Если изменения этих показателей пренебрежимо малы, то, как правило, фильтрационная часть миграционной задачи может рассматриваться обособленно от массопереноса».

При схематизации физико-химических процессов общие допущения, традиционные для гидродинамической теории миграции, сводятся к следующим положениям [3, с. 76–77]: «1) термодинамические условия – априорно заданы независимо от миграционного процесса (чаще всего считаются постоянными); 2) миграция каждого из компонентов рассматривается обособленно, без учета взаимного их влияния – и в растворе, и на минеральной фазе; 3) хотя для пластовых (особенно загрязненных) растворов характерно многообразие химических состояний содержащихся в них элементов, все оценки проводятся лишь для преобладающих миграционных форм с известными термодинамическими параметрами».

Из важнейших упрощающих предпосылок по поводу межфазового физико-химического взаимодействия ПВ с горными породами выделяются следующие [3, с. 77–78]: «1) пренебрежение кинетикой реакций; 2) аппроксимация зависимостей интенсивности реакций от концентраций соответствующих компонентов изотермами обмена. Реакции, протекающие непосредственно в подземном растворе (деструкция, радиоактивный распад и др.), обычно носят ярко выраженный кинетический характер. Как правило, удовлетворительная аппроксимация достигается в рамках моделей физико-химической кинетики первого порядка; в этом случае реакции преобразования растворов в пласте учитываются единственным показателем – обобщенным коэффициентом деструкции (распада)».

Схематизация миграционного процесса в гетерогенных ВК, как подчеркивают авторы [3, с. 78–79], требует «последовательного рассмотрения сменяющих друг друга в пространстве и во времени режимов массопереноса, в который на первый план выходят различные механизмы миграции (конвекция, механическая дисперсия, молекулярная диффузия, физико-химические взаимодействия). С этой точки зрения речь идет о многоуровневом протекании миграционного процесса, находящем свое формально-математическое отражение в описании различных стадий процесса различными моделями».

На основе рекомендаций [3], изложенных выше, нами проведена геофильтрационная и геомиграционная схематизация геолого-гидрогеологических условий фильтрации и миграции ПВ в объеме зон активного и замедленного водообмена водосборов рек Лесная и Мухавец.

Геофильтрационная схема условий миграции подземных вод. В качестве геофильтрационной основы для численной геомиграционной модели междуречья Западный Буг – Лесная – Мухавец первоначально использовали численную геофильтрационную модель водосборов рек Лесная и Мухавец (рабочее название модели – «LiM»). Детальная характеристика модели «LiM» и результаты решения задач по количественной оценке условий формирования инфильтрационного водообмена и естественных ресурсов ПВ в бассейнах рек Лесная и Мухавец приведены в статье [4]. Здесь следует отметить, что сеточная область

модели «LiM» является слишком грубой (шаг сетки равен 1000 м), поэтому целесообразность ее использования в качестве детальной геофильтрационной основы условий миграции ПВ выглядит сомнительной. Для получения представительных результатов моделирования желательно, чтобы шаг сетки геомиграционной модели был уменьшен в 3–5 раз.

С учетом имеющихся фактических данных по водосборам рек Лесная и Мухавец, а также технических возможностей вычислительных программ, нами создана детальная геофильтрационная модель (рабочее название – «ML-Mf»), на которой воспроизведена территория, ограниченная на западе руслом реки Западный Буг, на севере – руслом реки Лесная, на юге и востоке – руслом реки Мухавец (рис. 1). Таким образом, модель «ML-Mf» является крупномасштабной врезкой в региональную модель «LiM».

Увеличение детальности модели «ML-Mf» по сравнению с региональной моделью «LiM» достигнуто за счет сокращения шага сеточной области в 3 раза (с 1000 м до 333,33 м) и уменьшения размеров моделируемой области. Гидрогеологические параметры и прочие характеристики геофильтрационной модели «ML-Mf» не изменялись, т. е. сохранены количественные значения всех параметров, принятых в региональной модели «LiM».

В разрезе исследуемой области выделены четыре водоносных пласта (комплекса) и три разделяющих слоя [4]:

1-й водоносный пласт – водно-ледниковые, аллювиальные и озерно-болотные отложения, залегающие на днепровской морене;

1-й разделяющий слой – супеси и суглинки днепровской морены;

2-й водоносный пласт – песчаные отложения березинско-днепровского и палеоген-неогенового возраста;

2-й разделяющий слой – мергельно-меловая толща верхнего мела;

3-й водоносный пласт – пески сеноманского возраста и трещиноватые кавернозные известняки оксфордского яруса верхней юры;

3-й разделяющий слой – толща слабопроницаемых отложений мощностью 600–800 м от кембрийских «синих глин» до юры включительно;

4-й водоносный пласт – трещиноватая часть пород кристаллического фундамента и осадочные образования верхнего протерозоя.

Верхней и нижней границами моделируемой области являются уровенная поверхность ГВ и подошва зоны трещиноватости кристаллического фундамента соответственно. Реки Лесная, Лесная Левая, Лесная Правая, Мухавец, их притоки и мелиоративные каналы воспроизведены как внутренние границы 3-го рода. В модели «ML-Mf» созданы также три информационных слоя: «абсолютные отметки поверхности земли», «поверхностные воды», «инфильтрационное питание».

Региональная модель «LiM» и модель-врезка «ML-Mf» согласованы по условиям дискретизации исследуемого объекта, т. е. в области пересечения фрагментов модель более мелкого масштаба включает все сходственные точки модели более крупного масштаба. Использование моделей, согласованных по дискретизации исследуемой области, является важным средством повышения точности моделирования, так как в этом случае уменьшаются ошибки межузловой интерполяции сеточных функций. В нашем случае модели «LiM» и «ML-Mf» согласовываются между собой по дискретизации пространства таким образом, чтобы центры всех блоков (ячеек) модели «LiM» совпадали в сходственных точках с центрами расчетных блоков (ячеек) модели «ML-Mf». В центрах промежуточных ячеек, находящихся между сходственными точками, количественные значения напоров ПВ и гидрогеологических параметров определены путем интерполяции с помощью программы «SURFER».

Размеры территории, воспроизводимой на модели «ML-Mf», составляют 77,3 км с запада на восток (по оси X) и 43,3 км с юга на север (по оси Y). При шаге сеточной области 333,33 м получена размерность модели «ML-Mf» в плане: 232 расчетных блока по оси X и 130° – по оси Y.

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 расчеты переноса загрязнения производятся, прежде всего, на основе представления поля скоростей потока. Учитывая медленность процессов переноса, обычно допустимо для их расчета рассматривать геофильтрационный поток как стационарный (квазистационарный).

Значительное влияние на процессы переноса загрязнения оказывает профильная фильтрационная неоднородность потока по проницаемости, которая обуславливается в осадочных породах их слоистостью.

Существуют два принципиально различных метода учета такой неоднородности: непосредственной реализации профиля проницаемости при расчетах распределения скоростей переноса по мощности потока [5, с. 275] или опосредованного учета профильной неоднородности в модели конвективно-дисперсионного переноса [3, с. 84–85], при котором определяются средние по глубине потока содержания мигрантов, а расчетные значения коэффициента дисперсии находятся по данным натурных наблюдений в аналогичных условиях.

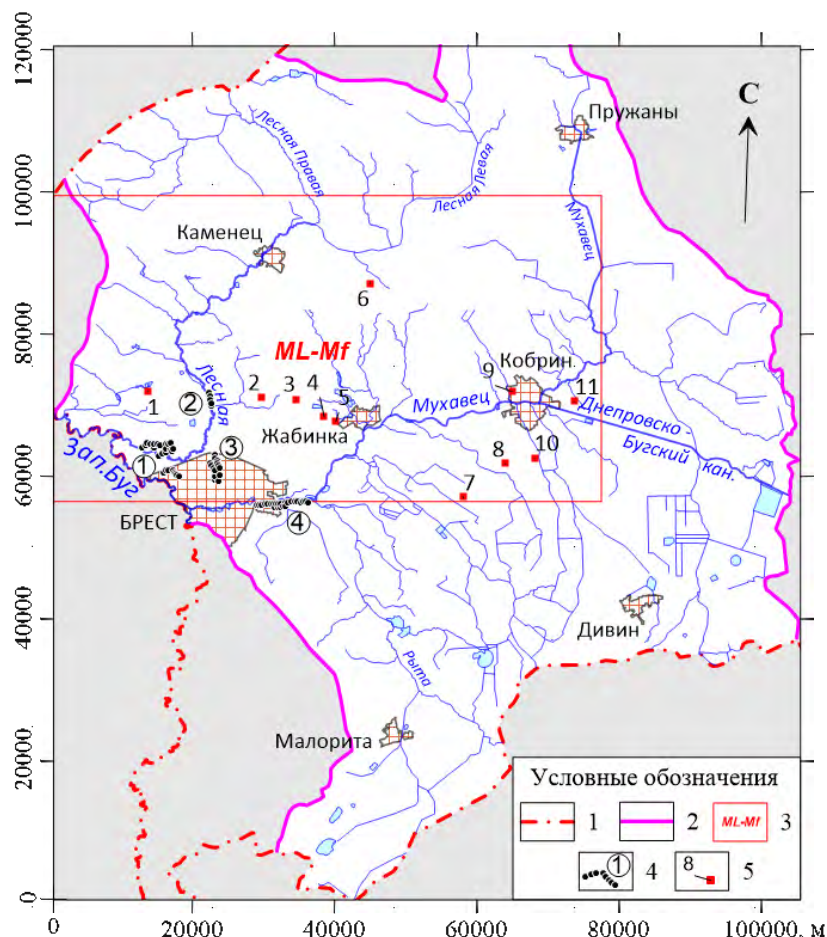


Рис. 1. Соотношение моделей «LiM» и «ML-Mf» в плане:

- 1 – государственная граница Республики Беларусь; 2 – граница бассейна р. Западный Буг; 3 – внешние контуры модели «ML-Mf»; 4 – водозаборы г. Бреста (1 – Западный; 2 – Северный; 3 – Граевский; 4 – Мухавецкий); 5 – объекты локального мониторинга (1 – свиноводческий комплекс «Западный»; 2 – полигон ТКО «Омелино»; 3 – полигон ТКО «Жабинка»; 4 – полигон ТКО «Саки»; 5 – поля фильтрации «Жабинковский сахарный завод»); 6 – полигон ТКО «Кукольчицы»; 7 – свиноводческий комплекс «Жабинковский ККЗ»; 8 – полигон ТКО «Такаши»; 9 – Кобринская птицефабрика; 10 – животноводческий комплекс «Хидры»; 11 – поля фильтрации «Залесье»)

Fig. 1. 'LiM' and 'ML-Mf' models correlation in a plan:

- 1 – the country border of the Republic of Belarus; 2 – the basin border of the Western Bug river; 3 – 'ML-Mf' outer contour model; 4 – Brest city water intakes (1 – Western; 2 – Northern; 3 – Graevsky; 4 – Muhavetsky); 5 – local monitoring objects (1 – 'Zapadniy' pig breeding complex; 2 – 'Omellino' SMW landfill; 3 – 'Zhabinka' SMW landfill; 4 – 'Saki' SMW landfill; 5 – JSC "Zhabinkovsky sugar factory" filtration fields); 6 – 'Kukolchitsy' SMW landfill; 7 – 'Zhabinkovsky FM' pig breeding complex; 8 – 'Takashi' SMW landfill; 9 – Kobrin poultry farm; 10 – 'Hidry' livestock complex; 11 – 'Zalesje' filtration fields)

В созданных нами геофильтрационных моделях использован первый путь – непосредственной реализации профильной неоднородности пород по проницаемости, который представляется более предпочтительным, поскольку позволяет дать более конкретную оценку влияния профильной неоднородности на распространение загрязняющих мигрантов по глубине потока, что особенно важно при изучении миграции загрязнения в потоках большой мощности.

После воспроизведения на модели-врезке «ML-Mf» всех параметров и элементов потока выполнено моделирование фильтрации ПВ в естественных условиях (работа гидротехнических сооружений, водозаборов, дренажей не моделировалась).

Схематизация процесса массопереноса. 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 определяют необходимость выполнения прогнозных оценок качественного состояния ПВ на основе нескольких подходов: 1) использования наиболее жесткой расчетной схемы, гарантирующей определенный инженерный запас в расчетах; 2) дальнейшего уточнения прогнозных оценок путем более полного учета в расчетных схемах пространственной изменчивости геофильтрационных и геомиграционных параметров, форм переноса вещества и физико-химических взаимодействий между раствором и породой.

На данном этапе исследований миграция загрязняющего вещества из расчетного блока с источником загрязнения рассчитывается путем решения прогнозной задачи на модели в соответствии с пространственной структурой потока грунтовых и межпластовых вод и принятыми к расчету миграционными параметрами.

Источники загрязнения. В число источников загрязнения включены пункты наблюдений локального мониторинга ПВ, находящихся на территории, воспроизведенной на геомиграционной модели междуречья Лесная – Мухавец (рабочее название «ML-Мм»). Эти пункты мониторинга утверждены постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 11.01.2017 № 5. Их местоположение показано на рис. 1 (всего 11 объектов):

1. *Свиноводческий комплекс «Западный».* Расположен в Брестском районе, в 2,0 км на северо-запад от д. Мотыкалы. Загрязнение животноводческими стоками (нитраты, хлориды, сульфаты, ионы натрия, калия).

2. *Полигон твердых коммунальных отходов (ТКО) «Омелино».* Расположен в Брестском районе, в 1,3 км юго-восточнее д. Омелино. Загрязнение тяжелыми металлами (цинк, молибден, кадмий), хлоридами, нитратами, сульфатами и органическими соединениями.

3. *Полигон ТКО «Жабинка».* Расположен в Жабинковском районе, в 10,0 км от г. Жабинка по дороге на Большие Мотыкалы, в 1,2 км от дороги Жабинка – Мотыкалы на северо-восток. Загрязнение тяжелыми металлами (цинк, молибден, кадмий), хлоридами, нитратами, сульфатами и органическими соединениями.

4. *Полигон ТКО «Саки».* Расположен в Жабинковском районе, в 4,0 км к западу от г. Жабинка, в 350 м на юго-запад от д. Саки. Загрязнение тяжелыми металлами (цинк, молибден, кадмий), хлоридами, нитратами, сульфатами и органическими соединениями.

5. *Поля фильтрации «Жабинковский сахарный завод».* Расположены в Жабинковском районе, в 2,0 км к юго-западу от г. Жабинка, в 1,3 км на юго-восток от д. Саки. Загрязнение азотом аммонийным, нитритами, нитратами, фосфатами, хлоридами, сульфатами, хромом, железом, марганцем, алюминием, медью, цинком, никелем, свинцом, кадмием, ртутью, нефтепродуктами, синтетическими поверхностно-активными веществами, фенолами.

6. *Полигон ТКО «Кукольчицы».* Расположен в Каменецком районе, в 17,5 км от г. Каменец на юго-восток и в 1,1 км от д. Кукольчицы на юго-запад.

7. *Свиноводческий комплекс «Жабинковский ККЗ».* Расположен в Жабинковском районе, в 1,9 км на северо-восток от д. Сычёво. Загрязнение животноводческими стоками (нитраты, хлориды, сульфаты, ионы натрия, калия).

8. *Полигон ТКО «Такаши».* Расположен в Кобринском районе, в 9,0 км к югу от г. Кобрин, в 1,1 км западнее д. Каташи. Загрязнение тяжелыми металлами (цинк, молибден, кадмий), хлоридами, нитратами, сульфатами и органическими соединениями.

9. *Кобринская птицефабрика.* Расположена в западной части г. Кобрин. Загрязнение ГВ аммонийным азотом, нитратами, сульфатами, ионами натрия, калия.

10. *Животноводческий комплекс «Хидры».* Расположен в Кобринском районе, в 800 м на юго-запад от д. Хидры. Загрязнение ГВ хлоридами, нитратами, сульфатами, ионами натрия, калия.

11. Поля фильтрации «Залесье». Расположены в Кобринском районе, в 1,8 км к юго-западу от д. Залесье. Загрязнение ГВ хлоридами, нитратами, сульфатами, ионами натрия, калия.

Краткая характеристика численной геомиграционной модели междуречья Лесная – Мухавец. Геомиграционная модель междуречья Лесная – Мухавец создана на основе геофильтрационной модели «ML-Mf». Для моделирования миграции загрязняющих веществ в ПВ нами использована вычислительная программа MTS (Mass Transport Simulation – Моделирование массопереноса в подземных водах; разработчик – А. М. Свищев, ЗАО «Геолинк»). Программа MTS предназначена для моделирования переноса в воде химического компонента и расчета распределения концентрации в пространстве и времени. Предполагается, что изменение концентрации в системе может быть вызвано следующими процессами:

- конвективным переносом, в котором растворенные химические компоненты движутся вместе с фильтрационным потоком;
- гидродинамической дисперсией, при которой молекулярная диффузия и неравномерность скоростей фильтрации в отдельных порах или системе вызывают рассеяние вещества;
- источниками воды и вещества;
- реакциями, в ходе которых некоторое количество растворенных химических веществ может быть добавлено или извлечено из ПВ в результате физико-химических реакций в водной фазе или в системе «вода – порода».

Моделирование задач массопереноса в ПВ осуществляется на основе численного решения классического уравнения конвективной диффузии. Решение осуществляется методом характеристик, теория которого изложена в работах [1, 6, 7] и др.

При геомиграционном моделировании изменения качества ПВ в междуречье Лесная – Мухавец нами принималось, что перенос мигранта в водоносных пластах происходит конвективно-дисперсионным путем. Коэффициенты дисперсивности водоносных песков приняты по литературным источникам [5, 8–10] одинаковыми для грунтового и межпластовых водоносных горизонтов: коэффициент продольной дисперсии – 0,001 м; коэффициент поперечной дисперсии – 0,0001 м. Процессы сорбции не учтены. Наиболее характерные для исследуемого района значения активной пористости водоносных горизонтов и разделяющих слоев приняты по аналогии с Гомельским регионом [10, 11]: грунтовый водоносный горизонт – 0,10; палеоген-среднечетвертичный водоносный горизонт – 0,13; оксфорд-сеноманский водоносный горизонт – 0,15. Мощности водоносных горизонтов и разделяющих пластов заданы по данным государственного предприятия «НПЦ по геологии».

Концентрация мигранта (загрязняющих веществ) во всех источниках загрязнения, заданных на модели «ML-Mм», принята равной 100 условных единиц (100 %). Мигрант поступает в грунтовый водоносный горизонт с техногенным инфильтрационным питанием, в котором концентрация мигранта принимается равной 100 условных единиц. Величина (интенсивность) техногенного питания принята равной 200 мм/год плюс интенсивность инфильтрационного питания ГВ в естественных условиях. Столь значительное увеличение питания ГВ на площади размещения источников загрязнения объясняется частичным перехватом атмосферных осадков и подачей жидких стоков на поверхность объектов локального мониторинга.

В качестве мигранта может рассматриваться любой консервативный элемент (наиболее характерными являются хлор-, нитрат- и сульфат-ионы). Поваренная соль, сульфаты и нитраты – наиболее характерные консервативные загрязняющие вещества, которые обычно хранятся на поверхности земли или в зоне аэрации (солеотвалы ОАО «Беларуськалий», отвалы фосфогипса ОАО «Гомельский химический завод», животноводческие комплексы, поля фильтрации).

Прогноз изменения качества подземных вод в условиях естественного режима фильтрации. При решении прогнозных задач на модели «ML-Mм» за основу взято поле скоростей ПВ при естественном режиме фильтрации, полученное в результате решения геофильтрационных задач на модели «ML-Mf» (работа гидротехнических сооружений, водозаборов, дренажей не моделировалась). Задача решена в стационарной постановке. Моделирование переноса загрязнений выполнено на 100 лет с временным шагом $\Delta t = 5$ лет. Решение получено на моменты времени $t = 5, 10, \dots, 100$ лет. Для первых 25 лет расчеты проведены с временным шагом $\Delta t = 1$ год. Все источники загрязнения включаются одновременно.

По результатам моделирования получены расчетные значения концентрации мигранта во всех водоносных горизонтах по всему полю моделируемой области на заданные моменты времени. В обобщенном виде результаты моделирования приведены в табл. 1. В ней по каждому ВК показана площадь ареала загрязнения с концентрацией мигранта более 5,0 %, а также максимальная и средняя концентрация мигранта в ареале загрязнения на каждом расчетном моменте времени (временном интервале).

Таблица 1. Обобщенные прогнозные данные по изменению качества подземных вод в зоне влияния источников загрязнения (без учета влияния гидротехнических сооружений)

Table 1. Generalized forecast data on the quality change of underground waters in the zones of pollution sources influence (do not taking into account hydro-technical buildings influence)

Прогнозный период, лет	Водоносный комплекс	Количество расчетных блоков модели с $C > 5,0 \%$	Площадь загрязнения с $C > 5,0 \%$, км ²	Концентрация мигранта C , %	
				средняя	максимальная
0–5	Грунтовый	76	8,43	24,46	59,40
	Палеоген-среднечетвертичный	24	2,66	7,92	14,56
	Оксфорд-сеноманский	—	—	—	—
0–10	Грунтовый	124	13,75	28,91	78,76
	Палеоген-среднечетвертичный	49	5,43	16,02	36,31
	Оксфорд-сеноманский	—	—	—	—
0–25	Грунтовый	245	27,17	30,41	96,92
	Палеоген-среднечетвертичный	151	16,74	20,38	70,83
	Оксфорд-сеноманский	4	0,44	5,21	5,28
0–50	Грунтовый	335	37,15	29,99	99,93
	Палеоген-среднечетвертичный	269	29,83	25,38	96,13
	Оксфорд-сеноманский	37	4,10	7,72	12,69
0–100	Грунтовый	428	47,46	26,82	100,00
	Палеоген-среднечетвертичный	474	52,56	23,03	99,91
	Оксфорд-сеноманский	126	13,97	9,12	24,55

Динамика роста площади ареалов загрязнения подземных вод. На начальный момент времени ($t = 0$) суммарная площадь земель под источниками загрязнения на модели «ML-Мм» равна 2,9 км². Через 5 лет общая площадь ареалов загрязнения ПВ грунтового ВК (по изолинии концентрации мигранта 5,0 %), включая площадь самих объектов локального мониторинга, составляет 8,44 км², а через 100 лет она достигает 47,5 км², т. е. увеличивается в 5,6 раза, или в 16,5 раза в сравнении с площадью самих источников загрязнения. Примерно такая же динамика характерна и для межпластовых ВК (рис. 2).

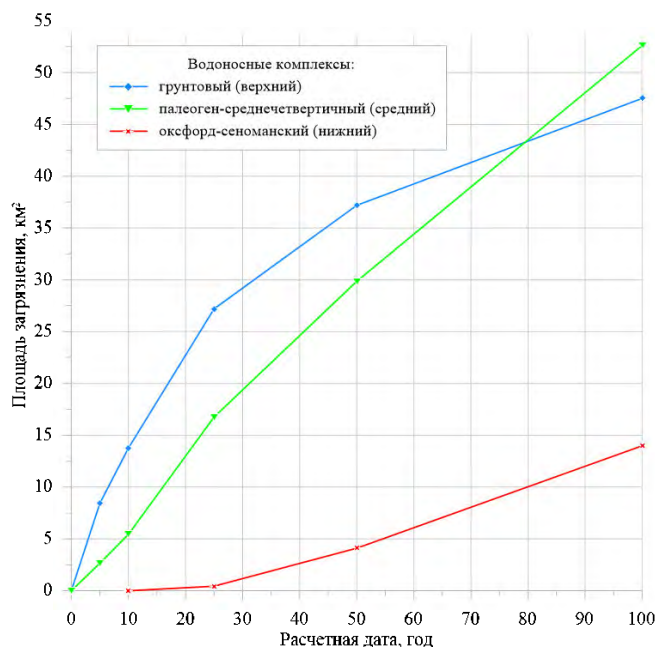


Рис. 2. Динамика роста площади ареалов загрязнения подземных вод грунтового, палеоген-среднечетвертичного и оксфорд-сеноманского водоносного комплекса (по изолинии $C = 5 \%$)

Fig. 2. Dynamics in the area growth of the pollution aureoles of the underground waters of ground, Paleogene-Middle Quaternary and Oxfordian-Cenomanian aquiferous water complexes (according to the isoline of $C = 5 \%$)

По результатам расчетов составлены прогнозные карты загрязнения ПВ грунтового, палеоген-среднечетвертичного и оксфорд-сеноманского ВК на $t = 100$ лет (рис. 3).

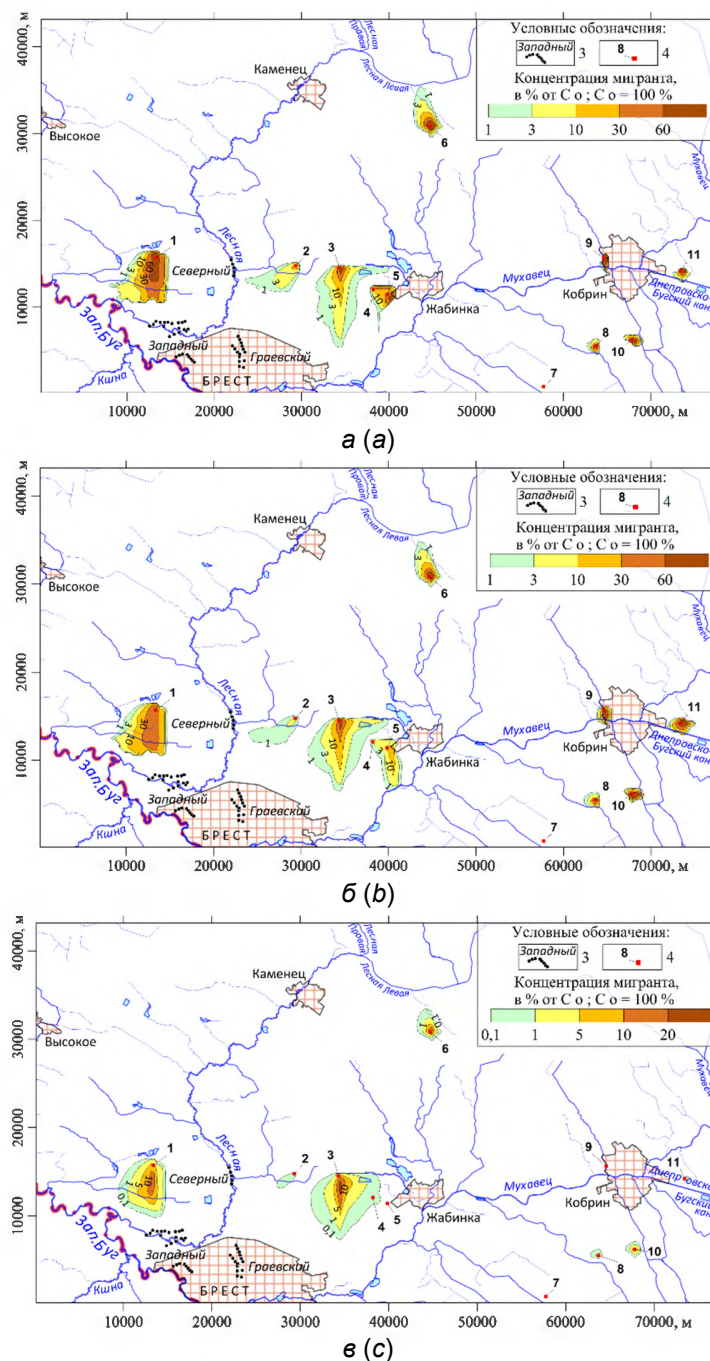


Рис. 3. Прогнозные карты загрязнения ПВ грунтового (а), палеоген-среднечетвертичного (б) и оксфорд-сеноманского (в) водоносных комплексов на объектах локального мониторинга в бассейнах рек Лесная и Мухавец на прогнозный период 100 лет

Fig. 3. The forecast maps of the underground waters pollution of ground (a), Paleogene-Middle Quaternary (b) and Oxfordian-Cenomanian (c) aquiferous water complexes on the local object monitoring of Lesnaya and Muhavets river basins on forecast period of 100 years

Анализ приведенных прогнозных карт показывает, что миграция загрязнений во времени идет крайне медленно. В течение прогнозного периода (100 лет) загрязнению подвергаются грунтовый, палеоген-средне-четвертичный и оксфорд-сеноманский ВК. Верхнепротерозойский-нижнекембрийский ВК, входящий в зону замедленного водообмена, загрязнению не подвергается. Расчетная концентрация мигранта в этом комплексе через 100 лет не превышает 0,003 % от его концентрации в источниках загрязнения.

Прогноз изменения качества подземных вод при нарушенном режиме фильтрации. Выше изложены результаты, полученные нами по миграции загрязняющих веществ в естественном потоке ПВ междуречья Лесная – Мухавец, т. е. в потоке, пространственная структура которого не нарушена работой водозаборов, дренажей и других гидротехнических сооружений. Известно, что загрязнение, как правило, перемещается туда и так, куда и как течет вода [12]. А гидротехнические сооружения, в особенности централизованные водозаборы, очень сильно влияют на пространственную структуру потоков ПВ и скорости их движения. По состоянию на 01.01.2015 только для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Бреста отбиралось около 65 500 м³/сут воды из подземных источников (по данным филиала «БКГРЭ» государственного предприятия «НПЦ по геологии»). Для учета данного фактора в прогнозных оценках необходимо воспроизвести на геофильтрационной модели работу водозаборов. Но главная проблема состоит в том, что г. Брест и все брестские водозаборы находятся вблизи государственной границы Республики Беларусь с Польшей, поэтому на модели следует воссоздать подземную гидросферу территории Польши в пределах, как минимум, радиуса влияния водозаборов. Тогда корректность решения миграционных задач, направленных на оценку и прогноз качества пресных ПВ, значительно повысится. Для решения возникшей проблемы необходимо расширить ранее созданную геофильтрационную модель «LiM» в западном направлении на 30–40 км, т. е. на расстояние, превышающее радиус влияния водозаборов г. Бреста.

Краткая характеристика численной геофильтрационной модели водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец. В районе г. Бреста в р. Западный Буг впадает р. Кшна, водосбор которой полностью находится на территории Польши. Кшна (польск. Krzna) – река в Польше, левый приток Западного Буга. Протекает в Бельском повите Люблинского воеводства. Длина реки – 120 км. Площадь водосбора – 3353 км². Кшна образуется на юго-западной окраине города Мендзыжец-Подляски слиянием небольших рек Южная Кшна и Северная Кшна. Река течет на северо-восток по Западному Полесью, долина частично заболочена, русло сильно извилистое, частично спрямлено гидрологическими работами. Крупнейший населенный пункт на реке – город Бяла-Подляска.

Территория водосбора р. Кшна и часть бассейна р. Западный Буг севернее р. Кшна (рис. 4) включены нами в моделируемую область создаваемой геофильтрационной модели (рабочее название модели – «KLiM») – по первым буквам рек, водосборы которых составляют основную часть моделируемой области). В целом ранее созданная геофильтрационная модель «LiM» расширяется в западном направлении (по оси X) на 50 км. По оси Y (с юга на север) сохраняются размеры модели «LiM». Таким образом, размеры модели «KLiM» в плане составляют 156 км×121 км (156 блоков по оси X и 121 – по оси Y).

В вертикальном разрезе сохраняется структура моделей «LiM» и «ML-Mf». Всего задано четыре водоносных пласта и три разделяющих слоя. В численной геофильтрационной модели (ЧГФМ) водосборов Кшна, Лесная и Мухавец сохранены также информационные слои «абсолютные отметки поверхности земли», «поверхностные воды», «инфильтрационное питание».

Слой «абсолютные отметки поверхности земли» (рис. 5) предназначен для вычисления глубин залегания уровней ГВ. На рис. 5 цветными сплошными линиями показаны горизонталы, имеющие абсолютные отметки 130, 140, 150, 160 и 175 м.

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.

В исходной ЧГФМ «KLiM» все информационные и расчетные пласты и слои имеют повсеместное распространение. Проводимости ВК и коэффициенты перетока слабопроницаемых слоев определены с учетом изменения мощностей основных стратиграфических подразделений на основе структурных карт, приведенных в опубликованных и фондовых работах государственного предприятия «НПЦ по геологии» и НАН Беларуси.

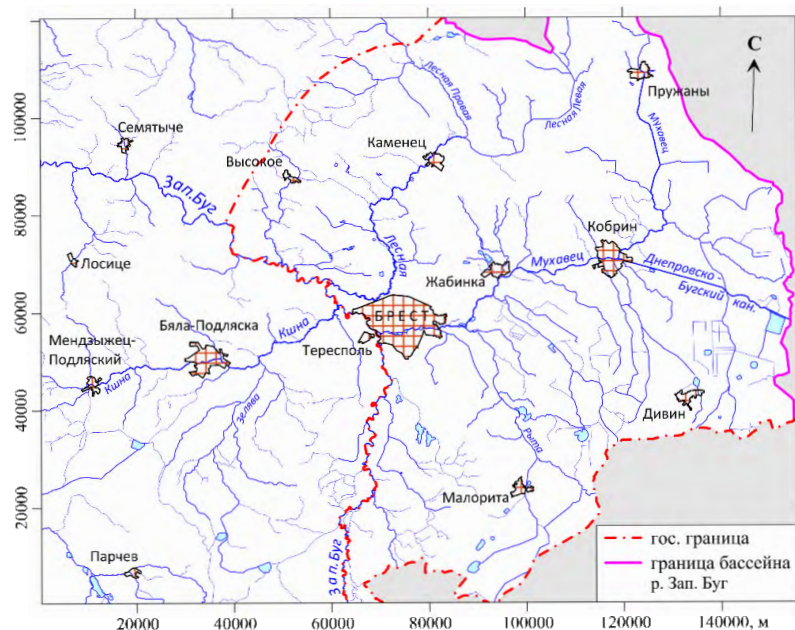


Рис. 4. Гидрографическая сеть водосборов рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающих территорий

Fig. 4. The hydrographical network of Kshna, Lesnaya, Muhovets river water catchment areas and the territories nearby

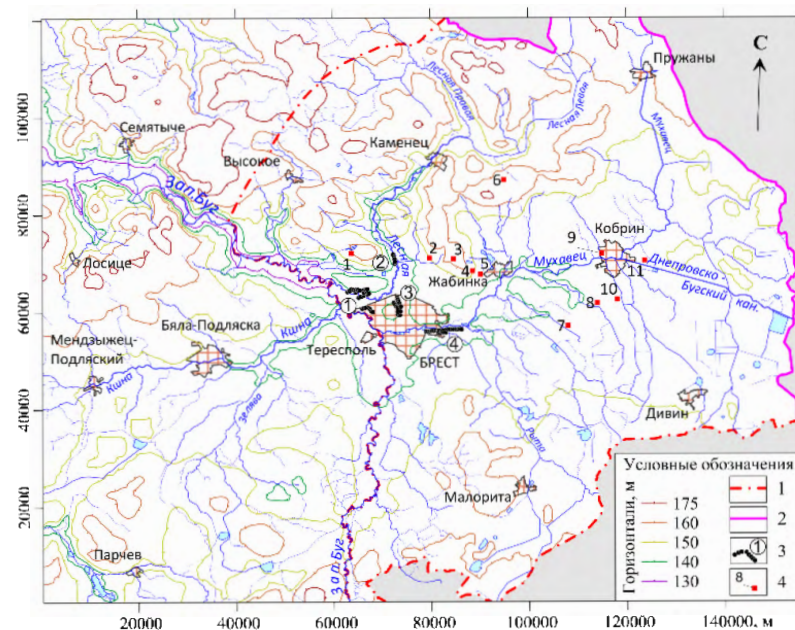


Рис. 5. Рельеф водосборов рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающих территорий:
1 – государственная граница Республики Беларусь; 2 – граница бассейна р. Западный Буг;
3 – водозаборы г. Бреста; 4 – объекты локального мониторинга;
см. детализацию условных обозначений 3 и 4 на рис. 1

Fig. 5. The relieve of the Kshna, the Lesnaya, the Muhovets rivers and the territories nearby:
1 – the country border of the Republic of Belarus; 2 – the border of Western Bug river basin;
3 – Brest city water intakes; 4 – local monitoring objects; see the symbols specification of 3 and 4 on fig. 1

Гидродинамические условия на границах модели «KLIM». Верхней границей области фильтрации является уровенная поверхность ГВ. По белорусской части исследуемого объекта использована карта гидроизогипс территории водосборов рек Лесная и Мухавец. Схема гидроизогипс для территории Польши построена по материалам из интернет-источников (рис. 6). Ее корректировка и согласование с поверхностными водотоками выполнена при калибровки модели «KLIM».

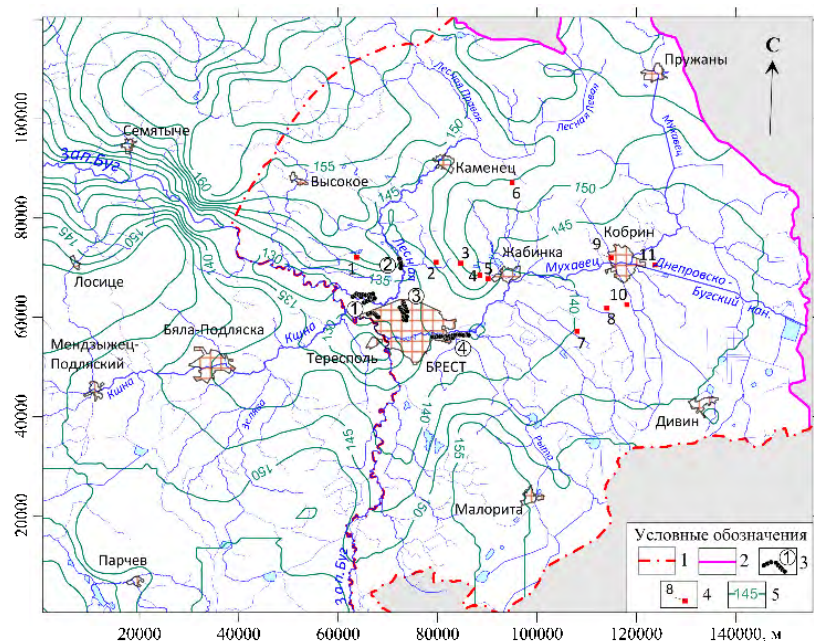


Рис. 6. Карта гидроизогипс водосборов рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающих территорий: 1–4 – те же, что и на рис. 5; 5 – гидроизогипсы

Fig. 6. The maps of the hydroisohypses of Kshna, Lesnaya, Muhavets rivers water catchment areas and the territories nearby: 1–4 – see the symbols specification on fig. 5; 5 – hydroisohypses

Параметрами, которые количественно характеризуют степень гидравлической связи подземных и поверхностных вод через подрусловые отложения водотоков и водоемов, являются коэффициент фильтрации k_f и мощность m_f слабопроницаемых отложений в ложе водотока. При расчетах обычно используют коэффициент взаимосвязи $\chi_f = k_f / m_f$ и параметр $\Delta L = (T m_f / k_f)^{1/2}$, характеризующий степень гидродинамического несовершенства водотока (где T – проводимость водоносного горизонта вблизи водотока). Следует отметить, что практически всегда χ_f или ΔL оцениваются только для отдельных створов водотоков. Такие оценки носят локальный характер, поэтому характеризуют степень взаимосвязи поверхностных и ГВ лишь в тех расчетных блоках модели с рекой, по которым проводились режимные наблюдения или опытно-фильтрационные работы. Методическое обоснование возможности интерполяции полученных точечных результатов на всю гидрографическую сеть отсутствует.

На боковых границах грунтового и всех межпластовых ВК задано граничное условие 2-го рода с нулевым расходом ($Q = 0$). Физически это означает, что подземный и поверхностный водоразделы совпадают и водообмен с бассейнами соседних рек отсутствует. Внутренними границами являются реки Западный Буг, Кшна, Лесная, Мухавец, их притоки и мелиоративные каналы, а также эксплуатационные скважины водозаборов г. Бреста. Реки воспроизводятся как граничные условия 3-го рода. Водозаборные скважины заданы в виде граничного условия 2-го рода с постоянным дебитом ($Q = \text{const}$). За нижнюю (непроницаемую) границу модели «KLIM» принята подошва обводненных отложений осадочного чеха Подляско-Брестской впадины.

Территория моделируемых водосборов аппроксимирована квадратной сеткой с шагом 1000 м (156 блоков по оси X и 121 – по оси Y). Суммарная площадь водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец и сопредельных территорий, воспроизведенная на модели, равна 14 520 км² (всего 14 520 расчетных блоков (ячеек), из них 3864 – с поверхностными водоисточниками).

Калибровка численной геофильтрационной модели «KLiM». Калибровка выполнена по методике, апробированной и проверенной на примере модели «LiM» [4].

На 1-м этапе калибровки модели «KLiM» согласованы модельные и фактические (принятые в качестве исходных на модели) напоры ГВ. Величина коэффициента регуляризации (коэффициента перетока χ_{ϕ} фиктивного слабопроницаемого слоя на верхней гидродинамической границе модели «KLiM») при согласовании модельных и фактических напоров ГВ принята равной 0,001 1/сут. Для решения рассматриваемой задачи создана рабочая версия модели «KLiM» под именем «klim3wr».

Количественные значения элементов водного баланса всей исследуемой территории, полученные по результатам моделирования, в обобщенном виде представлены в табл. 2.

Таблица 2. Баланс грунтовых и поверхностных вод бассейнов рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающих территорий (после реализации на модели «klim3wr» речной сети в явном виде; $\chi_{\phi} = 0,001$ 1/сут)

Table 2. The balance of the underground and surface waters of Kshna, Lesnaya, Muhavets river basins and the territories nearby (after the realization on 'klim3wr' model of river network in obvious view; $\chi_{\phi} = 0.001$ 1/day)

Составляющая баланса	Единица измерения		
	м³/сут	мм/год	л/с·км²
Результирующая величина инфильтрационного питания грунтовых вод	730 613	18,37	0,58
Питание грунтовых вод из блоков с реками	51 009	1,28	0,04
Результирующая величина разгрузки грунтовых вод в реки	336 002	8,45	0,27
Результирующая величина разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	445 619	11,20	0,36
Нисходящий переток грунтовых вод в соседний водоносный пласт	584 279	14,69	0,47

На 2-м этапе калибровки модели «KLiM» получена заданная (требуемая) величина подземного стока в реки. Основным результатом этого этапа калибровки – оценка интенсивности инфильтрационного питания ГВ и общая структура баланса поверхностных, грунтовых и межпластовых вод на водосборах рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающей территории бассейна р. Западный Буг.

Результаты расчетов и моделирования по оценке структуры баланса грунтовых и поверхностных вод водосборов рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающих территорий после согласования исходной и модельной величины подземного стока в реки приведены в табл. 3.

Таблица 3. Общая структура баланса поверхностных, грунтовых и межпластовых вод водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец после согласования исходной и модельной величины подземного стока в реки (по результатам расчетов и моделирования)

Table 3. General balance structure of the surface, underground and interlayer waters of Kshna, Lesnaya and Muhovets rivers water catchment areas after the adjustment of the initial and model admeasurement of underflow into the rivers (according to the results of accounting and modelling)

Составляющая баланса	Единица измерения		
	м³/сут	мм/год	л/с·км²
Суммарная величина инфильтрационного питания грунтовых вод	405 6621	101,97	3,237
Суммарная величина питания грунтовых вод из блоков с реками	371	0,01	0,000
Суммарная величина разгрузки грунтовых вод в реки	1 718 317	43,19	1,371
Суммарная величина разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	2 338 675	109,22	1,866
Нисходящий переток грунтовых вод в палеоген-среднечетвертичный водносный комплекс	568 299	14,29	0,454
Нисходящий переток межпластовых вод из палеоген-среднечетвертичного водоносного комплекса в оксфорд-сеноманский водоносный комплекс	150 258	3,78	0,120
Нисходящий переток межпластовых вод из оксфорд-сеноманского водносного комплекса в верхнепротерозойский-нижнекембрийский водносный комплекс	834	0,02	0,001

На более подробной характеристике естественных ресурсов ПВ водосборов Кшна, Лесная и Мухавец не станем останавливаться, так как ЧГФМ «KLiM» и ее калибровка создавались для решения других задач, а естественные ресурсы ПВ водосборов рек Лесная и Мухавец рассмотрены в работе [4].

Моделирование работы водозаборов г. Бреста на численной геофильтрационной модели «KLiM». Существующее водоснабжение г. Бреста, по данным государственного предприятия «НПЦ по геологии», базируется на эксплуатации ПВ объединенного оксфорд-нижнесеноманского терригенно-карбонатного комплекса четырьмя групповыми водозаборами – Граевский-1, Мухавецкий, Западный, Северный, а также ведомственными скважинами (рис. 7). Суммарный водоотбор по состоянию на 01.01.2015 равен 65600 м³/сут, из них – 27 300 м³/сут отбирается на водозаборе Мухавецкий, 16 500 м³/сут – на водозаборе Граевский-1, 14 300 м³/сут – на водозаборе Западный и 7500 м³/сут – на Северном водозаборе.



Рис. 7. Схема водозаборов г. Бреста (составлена М. П. Михадюк)

Fig. 7. The scheme of Brest city water catchment areas (compiled by M. P. Mihadjuk)

Брестское месторождение пресных ПВ приурочено к бассейну р. Западный Буг и его притоков – рек Мухавец и Лесная. Действующие водозаборы расположены на территории города (Граевский-1), на его восточной (Мухавецкий) и западной (Западный) окраинах. Водозабор Северный удален на 6 км к северу от города.

Эксплуатационные запасы по водозаборах г. Бреста в объеме 86 000,0 м³/сут по категориям А + В впервые были утверждены протоколом ГКЗ СССР (Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых при Совете Министров СССР) от 30.08.1968 № 5472 по результатам поисково-разведочных гидрогеологических исследований, выполненных Белводгидротрестом в 1966–1968 гг.

К началу 1980-х годов суммарный водоотбор превысил количество утвержденных запасов и достиг 109 000,1 м³/сут, в связи с чем возникла острая необходимость в переоценке эксплуатационных запасов ПВ. Разведочные работы по переоценке запасов были выполнены Западной поисково-съёмочной партией Белорусской геолого-поисковой экспедиции. Работы заключались в изучении режима ПВ на участках действующих водозаборов и проведении детальной разведки Северного участка.

Гидрогеологические исследования, проведенные для переоценки запасов, сопровождались большим объемом буровых, опытно-фильтрационных, геофизических, лабораторных и других видов работ. В процессе работ были детализированы геологическое строение и гидрогеологические условия участков местоположения водозаборов Западный и Северный; по данным режима эксплуатации и большого объема опытно-фильтрационных работ определены расчетные гидрогеологические параметры основного и перекрывающих водоносных горизонтов и комплексов и разделяющих их водоупоров; установлены условия формирования эксплуатационных запасов эксплуатируемого оксфордского-нижнесеноманского ВК. Было показано, что эксплуатация водозаборов г. Бреста проходит в стационарном режиме, а стабилизация режима обусловлена перетеканием воды из грунтового водоносного горизонта при постоянном напоре в нем.

На основе полученных данных была проведена переоценка эксплуатационных запасов ПВ существующих и перспективных водозаборов аналитическим методом для стационарной фильтрации и математическим моделированием в нестационарной постановке. Подсчет запасов методом математического моделирования был выполнен кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии Гомельского государственного университета (исполнители – А. Ф. Акулевич и В. Г. Жогло). Эксплуатационные запасы в количестве 221 300,0 м³/сут были утверждены протоколом ГКЗ СССР от 18.09.1987 № 10251.

Последний отчет по переоценке эксплуатационных запасов на водозаборах г. Бреста на перспективу 2042 г. составлен филиалом «Белорусская гидрогеологическая экспедиция» государственного предприятия «НПЦ по геологии» в 2015 г. Основой отчета явились данные режима эксплуатации водозаборов, материалы разведочных работ, сведения по химическому составу ПВ эксплуатируемого и питающих ВК (ответственный исполнитель – ведущий гидрогеолог М. П. Михадюк). На основе анализа и обобщения имеющихся данных по геологическому строению, гидрогеологическим и гидрохимическим условиям Брестского месторождения пресных ПВ на участках Граевский-1, Мухавецкий, Западный и Северный установлено, что оксфордский-нижнесеноманский ВК, используемый в качестве эксплуатационного для водоснабжения г. Бреста, имеет повсеместное распространение как на участках водозаборов, так и в зоне их влияния, обладает относительно выдержанными и спокойными условиями залегания, выдержанной мощностью и однородными фильтрационными свойствами. Геологическое строение и гидрогеологические условия перекрывающих и подстилающих отложений в целом для всего района и каждого из участков водозабора в частности характеризуются полной аналогией. Мергельно-меловая толща среднего сеномана-кампана, являющаяся относительным водоупором, отделяющим эксплуатируемый комплекс от широко распространенного комплекса палеоген-неоген-четвертичных отложений, характеризуется повсеместным распространением и фильтрационной однородностью.

Фильтрационные характеристики эксплуатируемого ВК и перекрывающих горизонтов и комплексов (проводимость, параметр перетекания) с высокой степенью надежности определены как по результатам опытно-фильтрационных исследований, проведенных на водозаборах во время поисково-разведочных гидрогеологических работ, так и по режиму эксплуатации водозаборов.

Основным источником формирования эксплуатационных запасов ПВ оксфордского-нижнесеноманского ВК являются привлекаемые естественные ресурсы, формируемые за счет перетекания воды из грунтового водоносного горизонта и рек. Качество ПВ эксплуатируемого и перекрывающих водоносных горизонтов и комплексов, как в естественных условиях, так и за прошедший период эксплуатации, соответствует действующим нормам для вод хозяйственно-питьевого водоснабжения. Подсчет запасов выполнен аналитическим способом по схеме перетекания с постоянным напором в питающих горизонтах для условий неограниченного в плане пласта.

На утверждение республиканской комиссии по запасам полезных ископаемых Республики Беларусь представлены эксплуатационные запасы ПВ по категориям А + В + С оксфордского-нижнесеноманского ВК в количестве 221 700,0 м³/сут. Их распределение по участкам водозаборов и категориям приведено в табл. 4.

Таблица 4. Распределение эксплуатационных запасов Брестского месторождения подземных вод по участкам водозаборов и категориям

Table 4. The distribution of the exploitative stocks of Brest underground waters deposit according to water intakes and categories

Водозабор	Количество скважин			Расчетная нагрузка	Эксплуатационные запасы, тыс. м ³ /сут			
	всего	пробуренных	проектных		А	В	С	А + В + С
Граевский-1	18	18	–	2000	16,0	20,0	–	36,0
Мухавецкий	46	30	16	1900	29,7	57,7	–	87,4
Западный	23	23	–	1900	12,4	31,3	–	43,7
Северный	26	5	21	2100	7,7	23,1	23,8	54,6
<i>Всего</i>	113	76	37	–	65,8	132,1	23,8	221,7

Общая сумма утверждаемых эксплуатационных запасов ПВ, равная 221700,0 м³/сут, использована нами для оценки влияния водозаборов Граевский-1, Мухавецкий, Западный и Северный на качественное состояние ПВ. Решение геофильтрационной задачи выполнено в стационарной постановке на модели «KLiM».

По результатам расчетов построена цифровая карта понижения напоров ПВ эксплуатируемого оксфорд-сеноманского ВК, представленная на рис. 8, из которого видно, что вокруг водозаборов сформировалась обширная воронка депрессии и влияние водозаборов распространяется на территорию Польши.

Структура баланса поверхностных, грунтовых и межпластовых вод на территории водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец при проектной производительности водозаборов г. Бреста приведена в табл. 5.

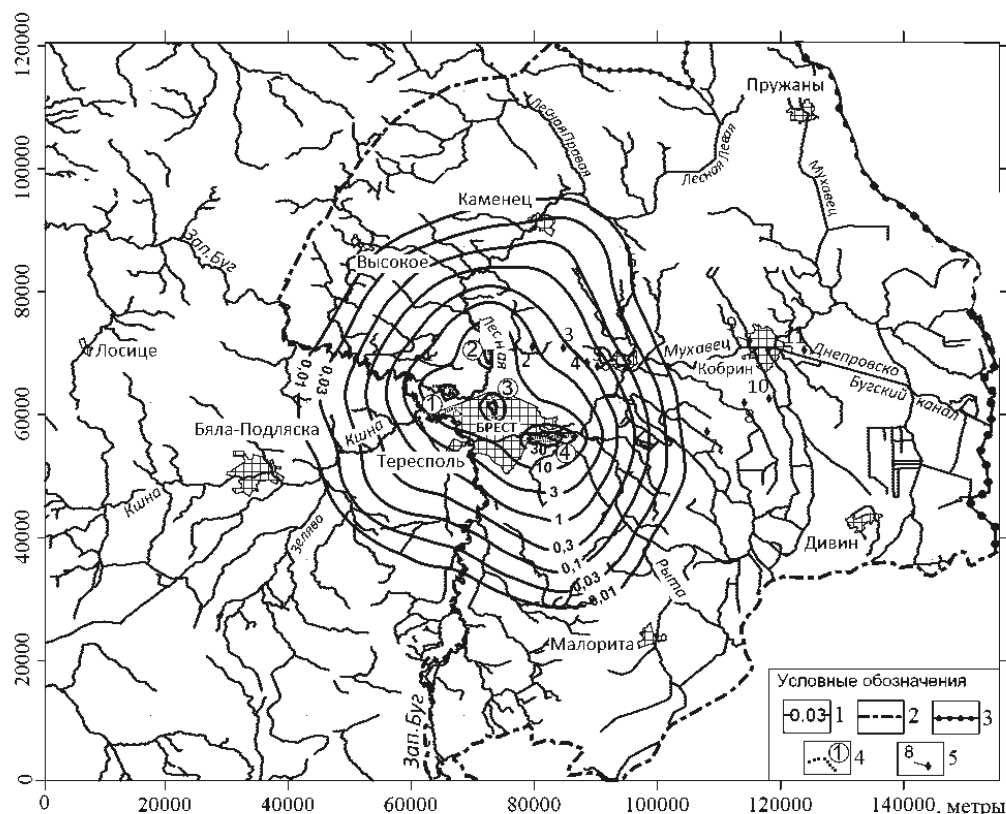


Рис. 8. Цифровая карта понижения напоров подземных вод оксфорд-сеноманского водоносного комплекса на территории водосборов рек Кшна, Лесная, Мухавец и прилегающих территорий при проектной величине водоотбора: 1 – изолинии понижения напоров подземных вод; 2 – государственная граница Республики Беларусь; 3 – граница водосборов рек Мухавец и Лесная; 4 – водозаборы г. Бреста; 5 – объекты локального мониторинга

Fig. 8. A numeric map of the decrease in the underground waters inrush of Oxfordian-Cenomanian aquifer water complex on the territory of the Kshna, the Lesnaya, the Muhavets rivers and the territories nearby during the project quantity of water abstraction: 1 – the isolines of the decrease in underground waters inrush; 2 – the country border of the Republic of Belarus; 3 – the borders of Muhavets and Lesnaya rivers water catchment areas; 4 – Brest city water intakes; 5 – local monitoring objects

Таблица 5. Структура баланса грунтовых и межпластовых вод на территории водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец при проектной производительности водозаборов г. Бреста на перспективу 2042 г., м³/сут

Table 5. The balance structure of underground and interlayer waters on the territory of Kshna, Lesnaya, Muhavets rivers water catchment areas during the project capacity of Brest city water intakes for the prospects of 2042, m³/day

Водоносный комплекс	Направление процесса	Водозаборы (Q = const)	Расход подземных вод через		Дисбаланс притока и оттока
			подолу ВК	кровлю ВК	
Грунтовый водоносный комплекс (верхний)	Приток	0,0	+527 209	+4 678 428	+4,0
	Отток	0,0	-748 905	-4 678 424	
Палеоген-среднечетвертичный водоносный комплекс (средний)	Приток	0	+132 841	+748 905	-4,0
	Отток	0,0	-354 541	-527 209	
Оксфорд-сеноманский водоносный комплекс (нижний)	Приток	0	+1571	+354 541	+0,0
	Отток	-221 700,0	-1571	-132 841	
Верхний протерозой – нижний кембрий (ЗЗВ)	Приток	0,0	0,0	+1571	+0,0
	Отток	0,0	0,0	-1571	

В условиях ненарушенного режима фильтрации ПВ в балансово-замкнутом гидрогеологическом объекте структура водообмена между водоносными горизонтами (комплексами, пластами) через слабо-проницаемые слои является весьма простой: нисходящие перетоки воды на водоразделах, включая другие возвышенные элементы рельефа, и восходящие перетоки в долинах рек и на других землях с пониженными отметками рельефа. При решении задачи в стационарной постановке суммарные величины перетоков равны по модулю, но отличаются по знаку. Некоторые балансовые расхождения могут быть вызваны вычислительными ошибками и возможностями алгоритмов, лежащих в основе компьютерных вычислительных программ.

В процессе работы водозаборов структура пространственного потока усложняется, а направления движения ПВ вод изменяются в соответствии конфигурацией речной сети и местоположением водозаборов. Наиболее интересны оценки по инфильтрационному водообмену, происходящему между поверхностью земли и депрессионной поверхностью ГВ, т. е. верхней гидродинамической границей моделируемой области (табл. 6).

Таблица 6. Структура баланса грунтовых и поверхностных вод на территории водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец при проектной производительности водозаборов г. Бреста на перспективу 2042 г., м³/сут

Table 6. The balance structure of underground and surface waters on the territory of Kshna, Lesnaya, Muhovets rivers water catchment areas during the project capacity of Brest city water intakes for the prospects of 2042, m³/day

Составляющая баланса	Единица измерения		
	м ³ /сут	мм/год	л/с·км ²
Суммарная величина инфильтрационного питания грунтовых вод	4 056 621	101,97	3,237
Суммарная величина питания грунтовых вод из блоков с реками	36 927	0,93	0,029
Сокращение величины разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	57 671	1,45	0,046
Суммарная величина разгрузки грунтовых вод в реки	1 655 865	41,62	1,321
Суммарная величина разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	2 273 654	57,15	1,814
Нисходящий переток грунтовых вод в палеоген-среднечетвертичный водоносный комплекс	748 905	18,83	0,598
Восходящий переток межпластовых вод из палеоген-среднечетвертичного водоносного комплекса в грунтовый водносный комплекс	527 209	13,25	0,421

Непосредственно на участках водозаборов эксплуатационные запасы межпластового оксфорд-сеноманского ВК формируются за счет перетоков воды через подошву вышележащего палеоген-среднечетвертичного ВК (+354 541 м³/сут – приток в пласт; –132 841 м³/сут – отток из пласта). Разница между притоком и оттоком представляет собой суммарный дебит водозаборов (–221 700 м³/сут – отток воды в скважины). Отмечается некоторая активизация потока ПВ в верхнепротерозойском-нижнекембрийском ВК зоны замедленного водообмена. Интенсивность водообмена с оксфорд-сеноманским ВК увеличилась с 834 до 1571 м³/сут. Однако верхнепротерозойский-нижнекембрийский ВК не участвует в формировании эксплуатационных запасов ПВ оксфорд-сеноманского ВК: приток воды снизу на участках размещения водозаборов (+1571 м³/сут) компенсируется оттоком вниз такого же количества воды (–1571 м³/сут) на периферии воронки депрессии.

По данным о структуре баланса грунтовых и поверхностных вод на территории водосборов рек Кшна, Лесная и Мухавец в естественных условиях (см. табл. 3) и при проектной производительности водозаборов г. Бреста (см. табл. 6) нами определены количественные показатели источников формирования эксплуатационных запасов ПВ Брестского месторождения (табл. 7).

Обычно на начальной стадии работы водозаборов важную роль играют упругие запасы ПВ в пределах формируемой воронки депрессии. В табл. 7 этот источник эксплуатационных запасов отсутствует, так как нами рассматривается стационарный процесс фильтрации, при котором изменения напоров ПВ во времени отсутствуют, соответственно, упругие запасы ПВ себя не проявляют.

Таблица 7. Источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод оксфорд-сеноманского водоносного комплекса при проектной производительности водозаборов г. Бреста, м³/сут**Table 7. The sources of the formation of the exploitative stocks of the underground waters of Oxfordian-Cenomanian aquifer water complex during Brest city water intakes project capacity, m³/day**

Источник эксплуатационных запасов подземных вод	Единица измерения		
	м³/сут	мм/год	л/с·км²
Перехват речного стока (привлекаемые ресурсы из рек)	36556	0,92	0,029
Сокращение разгрузки грунтовых вод в реки	62452	1,57	0,050
Прекращение разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	57671	1,45	0,046
Сокращение разгрузки грунтовых вод эвапотранспирацией	65021	1,63	0,052

Результаты решения геомиграционной задачи. Долгосрочный прогноз изменения качества подземных вод на территории водосборов рек Лесная и Мухавец. Технология моделирования. Модельные величины напоров межпластовых и ГВ, вычисленные при проектной производительности водозаборов г. Бреста, приняты в качестве исходных на боковых границах всех водоносных горизонтов геофильтрационной модели «ML-Mf». Заданы также все водозаборные скважины, попавшие на территорию, воспроизводимую на этой модели. Сюда вошли все эксплуатационные скважины водозаборов Западный, Северный и Граевский-1. На верхней границе модели «ML-Mf» воспроизведены реки, инфильтрационное питание и эвапотранспирационная разгрузка ГВ. При заданных таким образом граничных условиях решена геофильтрационная задача в стационарной постановке. Полученное поле скоростей ПВ принято за основу при решении геомиграционной задачи на модели «ML-Mm». По результатам моделирования определены расчетные значения концентрации мигранта во всех ВК на заданные моменты времени. В обобщенном виде результаты приведены в табл. 8.

Таблица 8. Обобщенные прогнозные данные по изменению качества подземных вод в зоне влияния источников загрязнения при проектной производительности водозаборов г. Бреста (модель «ML-Mm»)**Table 8. Generalized forecast data on the underground waters quality change in the zone of pollution sources influence during Brest city water intakes project capacity ('ML-Mm' model)**

Прогнозный период, лет	Водоносный комплекс	Количество расчетных блоков модели с $C > 5,0$ %	Площадь загрязнения с $C > 5,0$ %, км²	Концентрация мигранта C , %	
				средняя	максимальная
0–5	Грунтовый	71	7,88	23,96	59,06
	Палеоген-среднечетвертичный	21	2,33	7,24	14,35
	Оксфорд-сеноманский	–	–	–	–
0–10	Грунтовый	114	12,65	27,02	78,82
	Палеоген-среднечетвертичный	44	4,88	14,04	36,30
	Оксфорд-сеноманский	–	–	–	–
0–25	Грунтовый	208	23,09	27,25	96,84
	Палеоген-среднечетвертичный	109	12,10	20,29	70,42
	Оксфорд-сеноманский	4	0,44	5,48	5,83
0–50	Грунтовый	341	37,85	26,13	99,92
	Палеоген-среднечетвертичный	231	25,64	21,74	96,01
	Оксфорд-сеноманский	66	7,33	7,31	16,43
0–100	Грунтовый	464	51,50	24,46	100,00
	Палеоген-среднечетвертичный	393	43,62	22,79	99,91
	Оксфорд-сеноманский	186	20,65	10,06	32,51

Сравнение данных, приведенных в табл. 1 и табл. 8, показывает, что водозаборы г. Бреста не оказали значимого влияния на масштабы загрязнения ПВ грунтового и палеоген-среднечетвертичного ВК. Основные изменения связаны с оксфорд-сеноманским ВК. Отбор ПВ из этого продуктивного комплекса в объеме 221,7 тыс. м³/сут увеличивает напорные градиенты потока и, соответственно, скорости движения ПВ.

Более наглядно описываемый процесс отражает рис. 9, на котором показаны ареалы загрязнения ПВ оксфорд-сеноманского ВК при функционировании источников загрязнения в течение 50 и 100 лет.

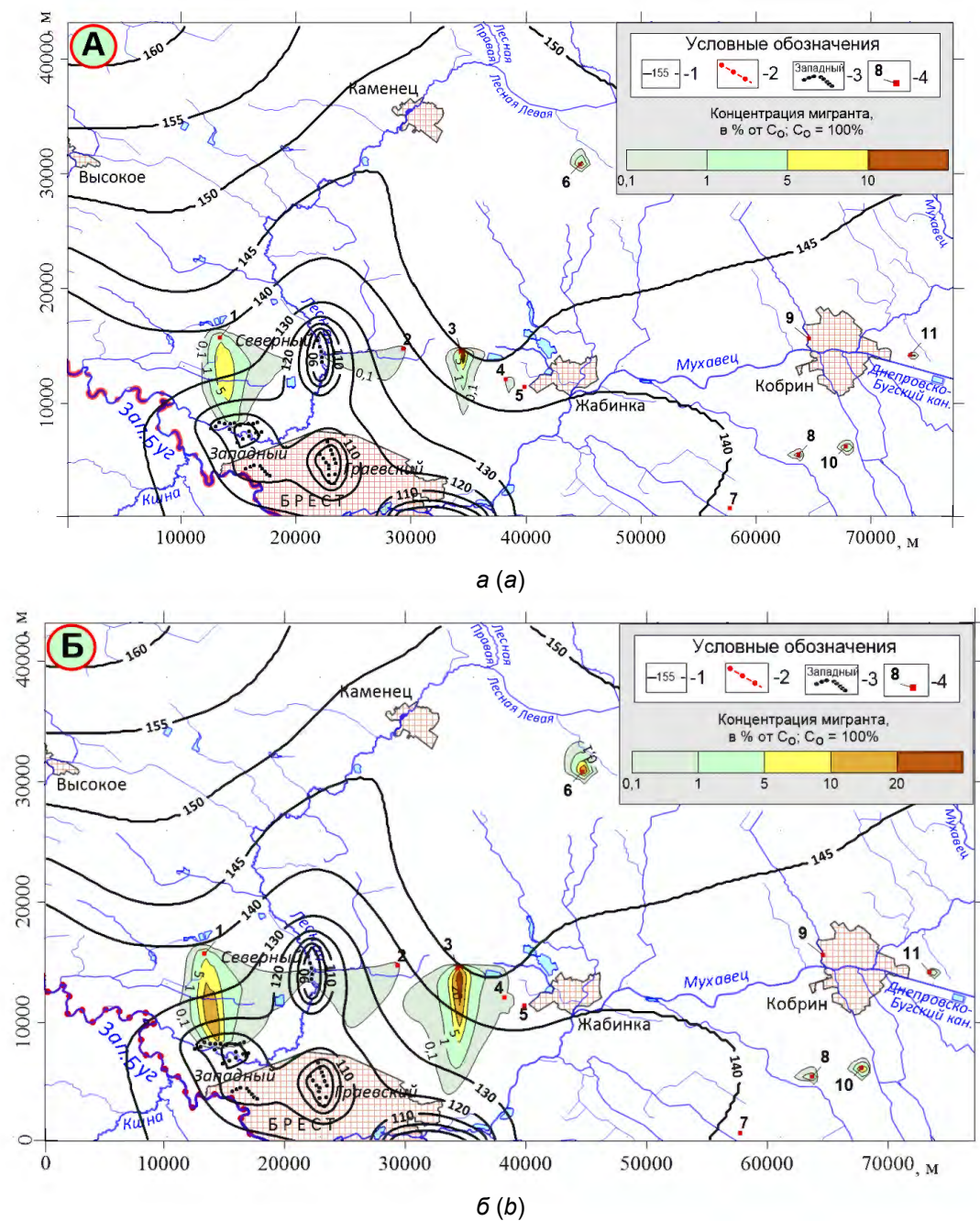


Рис. 9. Прогнозные карты загрязнения подземных вод оксфорд-сеноманского водоносного комплекса на объектах локального мониторинга в бассейнах рек Лесная и Мухавец при работе водозаборов г. Бреста с дебитом 221,7 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ на периоды 0–50 (а) и 0–100 (б) лет

Fig. 9. The forecast maps of the underground waters of Oxfordian-Cenomanian aquifer water complex pollution on the local monitoring objects in Lesnaya and Muhovets river basins during Brest city water intakes operation with the flow rate of 221.7 thous. m^3/day for the periods of 0–50 (a) and 0–100 (b) years

Судя по рис. 9, загрязняющие вещества уже достигли водозабора Западный. И если допустить, что свиноводческий комплекс «Западный» (см. рис. 9, источник загрязнения № 1), построен в 1970 г., то отходы его производства уже в наши дни могут быть обнаружены в ПВ, отбираемых из оксфорд-сеноманского ВК на водозаборе Западный. Обнадешивает лишь тот факт, что в настоящее время суммарный дебит водозаборов г. Бреста равен не 221,7 тыс. м³/сут, а лишь 65,5 тыс. м³/сут воды.

Выводы.

1. Создана численная модель фильтрации и миграции ПВ в зоне влияния водозаборов г. Бреста. Выполнен прогноз изменения качественного состояния ПВ в междуречье Лесная и Мухавец на длительную перспективу (до 100 лет) в естественных условиях и при работе водозаборов г. Бреста. По результатам моделирования составлены прогнозные карты загрязнения ПВ грунтового, палеоген-среднечетвертичного и оксфорд-сеноманского ВК на 5, 10, 25, 50 и 100 лет при фильтрации ПВ в естественных условиях и при работе водозаборов г. Бреста.

2. Установлено, что в естественных условиях миграция загрязнений во времени идет крайне медленно. В течение прогнозного периода (100 лет) загрязнению подвергаются грунтовой, палеоген-среднечетвертичный и оксфорд-сеноманский ВК. Негативному воздействию не подвергается верхнепротерозойский нижнекембрийский ВК, входящий в зону замедленного водообмена. Расчетная концентрация мигранта в этом комплексе через 100 лет не превышает 0,003 % от его концентрации в источниках загрязнения.

3. Водозаборы г. Бреста не оказали значимого влияния на масштабы загрязнения ПВ грунтового и палеоген-среднечетвертичного ВК. Основные изменения связаны с эксплуатируемым оксфорд-сеноманским ВК. Отбор ПВ из этого комплекса в объеме 221,7 тыс. м³/сут увеличивает напорные градиенты потока и, соответственно, скорости движения ПВ. В течение 50 лет фронт загрязнения от свиноводческого комплекса «Западный» подтягивается до линии водозабора «Западный», эксплуатационные скважины которого оборудованы на оксфорд-сеноманский ВК.

4. Для повышения надежности прогнозных оценок изменения качества ПВ необходим учет всех природных и техногенных факторов, оказывающих значимое влияние на условия миграции водорастворимых загрязняющих веществ в водонасыщенных горных породах.

5. Приведенные в статье результаты исследований могут рассматриваться как основа для обоснования решений по управлению качественным и количественным состоянием ПВ на территории водосборов рек Лесная и Мухавец.

Список использованных источников

1. Решение задач охраны подземных вод на численных моделях / Г. Н. Гензель, Н. Ф. Карачевцев, П. К. Коносавский [и др.] ; под ред. В. А. Мироненко. – М. : Недра, 1992. – 240 с.
2. Ломакин, Е. А. Численное моделирование геофильтрации / Е. А. Ломакин, В. А. Мироненко, В. М. Шестаков. – М. : Недра, 1988. – 228 с.
3. Мироненко, В. А. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах / В. А. Мироненко, Е. В. Мольский, В. Г. Румынин. – Л. : Недра, 1988. – 279 с.
4. Жогло, В. Г. Особенности формирования естественных ресурсов подземных вод Брестского гидрогеологического бассейна / В. Г. Жогло // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 94–122.
5. Шестаков, В. М. Гидрогеодинамика / В. М. Шестаков. – М. : КДУ, 2009. – 334 с.
6. Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ : учеб. пособие / под ред. Р. С. Штенгелова. – М. : Изд-во МГУ, 1994. – 335 с.
7. Гидрогеологическое прогнозирование : пер. с англ. / под ред. М. Г. Андерсона и Т. П. Берта. – М. : Мир, 1988. – 736 с.
8. Галкин, А. Н. Диффузионно-осмотические свойства глинистых грунтов Гомельского промышленного района : автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук : 04.00.07 / Галкин Александр Николаевич ; МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 1999. – 22 с.
9. Драйвер, Дж. Геохимия природных вод / Дж. Драйвер ; пер. с англ. Л. Н. Барабанова, Г. А. Соломина ; под ред. С. И. Смирнова. – М. : Мир, 1985. – 440 с.
10. Жогло, В. Г. Мониторинг подземных вод на водозаборах и экологически опасных объектах юго-востока Беларуси / В. Г. Жогло, А. Н. Галкин. – Витебск : ВГУ им. П. М. Машерова, 2008. – 161 с.
11. Жогло, В. Г. Система численных геофильтрационных моделей верхнего этажа гидrolитосферы юго-востока Республики Беларусь / В. Г. Жогло ; НАН Беларуси, Ин-т геол. наук. – Минск, 2001. – 176 с.
12. Шестаков, В. М. Геогидрология – научное направление и образовательная дисциплина / В. М. Шестаков // Вестник Московского университета. Серия 4, Геология. – 1999. – № 4. – С. 75–80.

References

1. Genzel' G. N., Karachevtsev N. F., Konosavskiy P. K., Kravchuk S. V., Mironenko V. A., Romanin V. G. *Reshenie zadach okhrany podzemnykh vod na chislennykh modelyakh* [Solving problems of groundwater protection on numerical models]. Ed. V. A. Mironenko. Moscow, Nedra Publ., 1992, 240 p. (in Russian)
2. Lomakin E. A., Mironenko V. A., Shestakov V. M. *Chislennoe modelirovanie geofil'tratsii* [Numerical modeling of geofiltration]. Moscow, Nedra Publ., 1988, 228 p. (in Russian)
3. Mironenko V. A., Mol'skiy E. V., Rumynin V. G. *Izucheniye zagryazneniya podzemnykh vod v gornodobyvayushchikh rayonakh* [Study of groundwater pollution in mining areas]. Leningrad, Nedra Publ., 1988, 279 p. (in Russian)
4. Zhoglo V. G. *Osobennosti formirovaniya estestvennykh resursov podzemnykh vod Brestskogo gidrogeologicheskogo basseyna* [Peculiarities of formation of natural groundwater resources of Brest hydrogeological basin]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 94–122. (in Russian)
5. Shestakov V. M. *Gidrogeodinamika* [Hydro-geodynamics]. Moscow, 2009, 334 p. (in Russian)
6. *Gidrogeodinamicheskie raschety na EVM* [Hydrogeodynamic calculations on the computer]. Ed. R. S. Shtengelova. Moscow, 1994, 335 p. (in Russian)
7. *Gidrogeologicheskoe prognozirovaniye* [Hydrogeologic forecasting]. Ed. M. G. Andersona and T. P. Berta. Moscow, Mir Publ., 1988, 736 p. (in Russian)
8. Galkin A. N. *Diffuzionno-osmoticheskie svoystva glinistyykh gruntov Gomel'skogo promyshlennogo rayona. Avtoreferat dissertatsii kandidata geologo-mineralgicheskikh nauk* [Diffusion-osmotic properties of clayey soils of Gomel industrial area. Abs. PhD geol.-mineral. sci.]. Moscow, 1999, 22 p. (in Russian)
9. Driver Dz. *Geokhimiya prirodnnykh vod* [Geochemistry of natural waters]. Moscow, Mir Publ., 1985, 440 p. (in Russian)
10. Zhoglo V. G., Galkin A. N. *Monitoring podzemnykh vod na vodozaborakh i ekologicheskii opasnykh ob'ektakh yugo-vostoka Belarusi* [Groundwater monitoring at water intakes and ecologically dangerous objects in the south-east of Belarus]. Vitebsk, 2008, 161 p. (in Russian)
11. Zhoglo V. G. *Sistema chislennykh geofil'tratsionnykh modeley verkhnego etazha gidrolitosfery yugo-vostoka Respubliki Belarus'* [System of numerical geofiltration models of the upper floor of the hydrolithosphere of the south-east of the Republic of Belarus]. Minsk, 2001, 176 p. (in Russian)
12. Shestakov V. M. *Geogidrologiya – nauchnoye napravleniye i obrazovatel'naya distsiplina* [Geohydrology – scientific direction and educational discipline]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya = Bulletin of Moscow University. Series 4. Geology*, 1999, no. 4, pp. 75–80. (in Russian)

Информация об авторе

Жогло Василий Гаврилович – доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией гидрогеологии и гидроэкологии, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: w.zhoglo50@tut.by

Information about the author

Vasily G. Zhoglo – Dr. Sc. (Geological and Mineralogical), Associate Professor, Head of the Lab of Hydrogeology and Hydroecology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: w.zhoglo50@tut.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-131-137>
УДК 556.38(476.1+476.4+476.6)

Поступила в редакцию 26.04.2025
Received 26.04.2025

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КОМФОРТНОСТЬ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ БЕЛАРУСИ

В. И. Пашкевич, Е. А. Кухарик, А. М. Кухарик

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В настоящей статье проанализированы гидрогеологические факторы, влияющие на комфортность среды обитания человека на территории Центральной Беларуси. Рассмотрены основные черты формирования подземной гидросферы в естественных условиях и в обстановках сосредоточенного техногенного воздействия, выражающегося в загрязнении грунтовых и напорных вод, связанных с более глубокозалегающими водоносными горизонтами; в истощении ресурсов подземных вод в результате изъятия их в местах расположения водозаборов и отдельных скважин.

Рассмотрены особенности взаимодействия подземных безнапорных (грунтовых) вод и поверхностных водных объектов (рек, озер, водохранилищ, родников), а также воздействие уровня режима грунтовых вод на состояние инженерных сооружений.

Показано, что гидрогеологические факторы, определяющие условия формирования ресурсов и качества пресных подземных вод, являются одними из важнейших, влияющих на комфортность среды обитания человека. Их учет важен при проведении эколого-геологических исследований и картирования.

Ключевые слова: подземные воды; загрязнение; истощение; комфортность среды обитания человека; Центральная Беларусь.

Для цитирования. Пашкевич В. И., Кухарик Е. А., Кухарик А. М. Гидрогеологические факторы, определяющие комфортность среды обитания человека на территории Центральной Беларуси // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 131–137.

HYDROGEOLOGICAL FACTORS DETERMINING THE COMFORT OF THE HUMAN HABITAT IN THE TERRITORY OF CENTRAL BELARUS

V. I. Pashkevich, E. A. Kukharik, A. M. Kukharik

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

Abstract. The present article analyzes hydrogeological factors that influence the comfort of the human habitat in a large region – Central Belarus. It considers the main features of the formation of the underground hydrosphere characteristics in natural conditions and in situations of concentrated technogenic impact, expressed in the pollution of groundwater, as well as pressure waters associated with deeper aquifers; in the depletion of groundwater resources as a result of their withdrawal at the locations of water intakes and individual wells.

Particular attention is paid to the consideration of the features of the interaction of underground unconfined (ground) waters and surface water bodies (rivers, lakes, reservoirs, springs), as well as the impact of the groundwater level regime on the state of engineering structures.

It is shown that hydrogeological factors that determine the conditions for the formation of resources and the quality of fresh groundwater are among the most important influencing the comfort of the human habitat. They are important to take into account when conducting ecological and geological studies and mapping.

Keywords: groundwater; pollution; depletion; comfort of human living environment; Central Belarus.

For citation. Pashkevich V. I., Kukharik E. A., Kukharik A. M. Hydrogeological factors determining the comfort of the human habitat in the territory of Central Belarus. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 131–137.

Введение. Подземные воды являются одним из важнейших компонентов окружающей среды и в силу этого значительное число гидрогеологических факторов, под воздействием которых происходит формирование запасов и качества подземных вод, способно оказывать весьма существенное влияние на комфортность среды обитания человека. По своему характеру это влияние может быть положительным или негативным, непосредственным (прямым) или косвенным. Наличие на конкретной территории значительных ресурсов пресных подземных вод питьевого качества в целом является важнейшим фактором, определяющим благоприятные условия проживания человека, развития сельского хозяйства и промышленности.

Республика Беларусь обладает большими запасами пресных подземных вод, на использовании которых базируется практически все хозяйственно-питьевое водоснабжение [1]. Величина их естественных ресурсов достигает 43,6 млн м³/сут (пресные подземные воды относятся к категории *возобновляемых* природных ресурсов, поэтому их количество оценивается в «расходных» единицах). Разведанные и утвержденные запасы подземных вод на конкретных месторождениях, используемых для нужд водоснабжения городов и поселков, составляют 6,8 млн м³/сут. Общий водоотбор подземных вод из утвержденных и неутвержденных запасов в настоящее время не превышает 2,2 млн м³/сут, что составляет только 5 % от объема постоянно возобновляемых естественных ресурсов пресных подземных вод. Это позволяет сделать вывод о том, что имеющиеся в Беларуси ресурсы пресных подземных вод многократно превышают современные и перспективные объемы их потребления. Высокая обеспеченность ресурсами пресных подземных вод, в целом хорошего качества, является важным фактором обеспечения устойчивого социально-экономического развития нашей страны, ее экологической и в значительной степени экономической безопасности.

Цель работы – провести анализ гидрогеологических факторов, оказывающих определенное влияние на комфортность среды обитания человека на территории Центральной Беларуси.

Материалы и методика исследования. При подготовке статьи использованы данные Государственного водного кадастра за 1994–2023 гг. [2], фондовые, литературные и авторские материалы, характеризующие современное состояние подземных вод на территории исследований, а также нормативные документы, регламентирующие качество питьевых вод, источников централизованного и нецентрализованного водоснабжения [3].

Результаты и их обсуждение. В настоящее время в соответствии с Водным кодексом Республики Беларусь [4] пресные подземные воды, которые относятся к одним из ценнейших видов гидрологических ресурсов, рекомендуется использовать в основном для удовлетворения хозяйственно-питьевых нужд и ограничено в промышленности (главным образом, в пищевой промышленности). Вместе с тем наличие в стране большого количества *возобновляемых* ресурсов пресных подземных вод позволяет ставить вопрос о целесообразности их более широкого использования и в других отраслях народного хозяйства, в частности в сельском хозяйстве для нужд орошения земель в условиях изменяющегося климата. Улучшение условий ведения сельского хозяйства и повышение его продуктивности косвенным образом будут влиять и на улучшение условий среды обитания человека.

Однако наличие значительных ресурсов пресных подземных вод не снимает с повестки дня проблему их рационального использования. В последние десятилетия пресные подземные воды испытывают постоянно возрастающие техногенные нагрузки. Они создают угрозу их качеству, а на участках интенсивного сосредоточенного водоотбора приводят к истощению их запасов. Так, например, в пределах Минской городской агломерации и на прилегающей территории, где расположено 12 крупных групповых водозаборов подземных вод с несколькими сотнями артезианских скважин, сформировалась огромная депрессионная воронка. Ее диаметр достигает 40 км, а понижение уровня подземных вод – до 30 м и более. Эта воронка оказывает негативное влияние и на поверхностные воды, обусловив резкое снижение стока малых рек – притоков Свислочи и Птичи (реки Цна, Слепянка, Переспа, Лошица, Волма, Жесть и др.) [5]. На некоторых участках произошло их полное пересыхание, что, безусловно, негативно влияет на уровень комфортности среды обитания в этом регионе.

Важнейшим гидрогеологическим фактором, определяющим комфортность среды обитания человека, является *качество пресных подземных вод*, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения. В первую очередь это касается сельского населения, существенная часть которого (не менее 1,5 млн человек) продолжает пользоваться колодцами, эксплуатирующими неглубоко залегающие грунтовые воды [6]. Последние активно подвергаются антропогенному загрязнению, главным образом коммунально-бытовому и сельскохозяйственному. Наиболее часто в водах колодцев наблюдается превышение уровня предельно допустимой концентрации (ПДК) по нитратам (NO₃⁻), который составляет 45 мг/л. Содержание этого компонента в водах колодцев нередко достигает 300–500 мг/л (7–11 ПДК), а в отдельных случаях – 800–1000 мг/л (18–22 ПДК). В целом превышение уровней ПДК по нитратам наблюдается в 40–80 % всех колодцев, обследованных в период 1990–2010 гг. Часто эти воды неблагополучны по микробиологическим показателям, величине общей жесткости (>10 мг-экв/л) и общей минерализации (>1000 мг/л) [7].

Вместе с тем следует отметить, что в последние десятилетия наблюдается тенденция постепенного снижения уровней техногенного загрязнения воды в сельских колодцах. Это связано как с сокращением количества домашнего скота и птицы на подворьях, так и со снижением интенсивности использования приусадебных участков. За период 2003–2020 гг. удельный вес проб источников нецентрализованного водоснабжения (прежде всего колодцев), не отвечающих гигиеническим нормативам по санитарно-клиническим показателям, в Беларуси уменьшился с 63,2 до 29,6 %. Однако масштабы загрязнения вод колодцев в целом все еще остаются очень высокими, и это позволяет констатировать, что проблема сельского водоснабжения является одной из самых актуальных геоэкологических проблем Беларуси.

Техногенное загрязнение затрагивает не только подземные воды первого от поверхности безнапорного водоносного горизонта – грунтовые воды. В последние годы оно все чаще фиксируется и в более глубоких напорных водоносных горизонтах, которые эксплуатируются системами центрального водоснабжения – артезианскими скважинами одиночных и групповых водозаборов в крупных населенных пунктах и на предприятиях. Такое загрязнение наблюдается на водозаборах «Новинки» и «Зеленовка» (г. Минск), «Лядище» (г. Борисов), «Парковый» (г. Орша), а также во многих одиночных водозаборных скважинах промышленных и сельскохозяйственных предприятий на территориях Минского, Борисовского, Молодечненского, Слуцкого и других районов Минской области. Наиболее часто такое загрязнение проявляется путем повышенного содержания в подземных водах нитратов (NO_3^-), – до 60–120 мг/л [8].

На территории Центральной Беларуси техногенное загрязнение в напорных подземных водах наблюдается в основном в скважинах, оборудованных на межморенный днепровско-сожский водоносный комплекс и расположенных вблизи потенциальных источников такого загрязнения – животноводческих ферм, участков частной застройки и сельскохозяйственных угодий. Так, на водозаборе «Новинки» (г. Минск), который эксплуатируется с 1932 г., нитратное загрязнение фиксируется в скважинах восточной его части, расположенных вблизи частной застройки и сельскохозяйственных угодий. В скважинах западного крыла водозабора, находящихся в лесопарковой зоне, такого загрязнения не выявлено. Известно, что в первые годы эксплуатации водозабора нитраты в нем полностью отсутствовали. В 1970-е годы стали проявляться первые следы нитратного загрязнения (до 20–27 мг/л). В начале 1990-х годов превышение ПДК (45 мг/л) фиксировалось лишь в одной скважине, а в начале 2000-х годов содержание NO_3^- достигало 50–67 мг/л уже в 6–7 скважинах. В этот период в отдельных эксплуатационных скважинах отмечались случаи загрязнения хромом (Cr^{6+}) и нефтепродуктами, а в результате протекания ионообменных процессов на участках загрязнения почвогрунтов по Na^+ и K^+ (компоненты удобрений и коммунально-бытовых стоков) в подземных водах резко возрастало содержание ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , формировавших повышенную их общую жесткость ($>7,0$ мг-экв/л, т. е. выше допустимого уровня в водах систем централизованного водоснабжения).

На водозаборе «Зеленовка» (г. Минск) нитратное загрязнение также фиксируется в скважинах, расположенных в основном вблизи частной городской застройки. Повышенное содержание нитратов, которое наблюдается на этом водозаборе, составляет 35–45 мг/л, т. е. близко к уровню ПДК. В ряде скважин здесь также отмечается загрязнение вод хромом (Cr^{6+}) – до 0,42 мг/л при уровне ПДК, равном 0,05 мг/л.

В некоторых скважинах на водозаборах «Вицковщина», «Фелицианово», «Водопои» фиксируется высокое содержание аммония (NH_4^+) – до 4,0–9,4 мг/л (ПДК = 2,6 мг/л). Формирование аммонийного загрязнения имеет достаточно сложный природно-техногенный характер и обусловлено процессами преобразования исходного нитратного загрязнения в аммонийное в бескислородной слабовосстановительной геохимической среде водоносных горизонтов: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$ [9].

По сравнению с городскими водозаборами в гораздо более сложных геоэкологических условиях находятся сотни одиночных ведомственных скважин на сельскохозяйственных и промышленных предприятиях. Нередко эти скважины располагаются непосредственно на территории животноводческих ферм и промышленных площадках предприятий, что не позволяет в общей мере обеспечить соблюдение необходимого режима в зонах их санитарной охраны. Как следствие, в таких скважинах наиболее часто фиксируются случаи техногенного загрязнения по многим компонентам (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , тяжелые металлы, нефтепродукты и др.).

На процесс формирования техногенного загрязнения пресных подземных вод хозяйственно-питьевого назначения, которое значительно ухудшает уровень комфортности среды обитания человека, большое влияние оказывают такие гидрогеологические факторы, как глубина залегания подземных вод и проницаемость покровных отложений. Они в своей совокупности определяют *степень защищенности подземных вод от загрязнения*. В отношении подземных вод первого от поверхности безнапорного водоносного горизонта (грунтовые воды) глубина их залегания соответствует мощности зоны аэрации, а проницаемость покровных отложений характеризуется их литологическим составом: от самых проницаемых песчаных отложений к менее проницаемым супесям и далее к суглинкам и глинам. Исходя из соотношения на каждом конкретном участке глубины залегания грунтовых вод (<1 м; от 1 до 2 м; от 2 до 5 м; от 5 до 10 м; >10 м) и различающихся по проницаемости литологических разностей покровных отложений (пески, супеси, суглинки, глины) оценивается степень защищенности подземных вод от поверхностного загрязнения. На территории Центральной Беларуси подземные воды преимущественно характеризуются как «незащищенные» и «слабозащищенные» от поверхностного загрязнения. Это обуславливает необходимость чрезвычайно внимательно относиться к вопросам охраны подземных вод от любых видов загрязнения (сельскохозяйственного, коммунально-бытового, промышленного, транспортного и др.). В подземных водах, в отличие от поверхностных, сформировавшееся загрязнение способно сохраняться многие годы и десятилетия вследствие сравнительно низких темпов водообмена, низких температур и ряда других факторов.

На качество пресных подземных вод как основного источника хозяйственно-питьевого водоснабжения населения негативное влияние может оказывать не только техногенное загрязнение, но и ряд *природных гидрогеохимических особенностей* этих вод. Речь идет о том, что и в естественных условиях в подземных водах некоторые компоненты их химического состава могут присутствовать в концентрациях, превышающих уровни ПДК в питьевых водах. Наиболее часто это наблюдается в отношении железа ($Fe_{общ.}$). При уровне ПДК этого компонента, равном 0,3 мг/л, содержание его в подземных водах нередко составляет 1,5–3,0 мг/л и более. Превышение этого норматива (0,3 мг/л) фиксируется более чем в 50 % всех артезианских скважин на территории Беларуси, а в некоторых районах – в 70–80 % и более [8]. Это в значительной степени осложняет использование подземных вод для хозяйственно-питьевых целей и обуславливает необходимость широкого применения на водозаборах систем обезжелезивания. Присутствие повышенного содержания железа в подземных водах всегда обуславливает также их повышенную цветность и мутность, которые формируются в процессе окисления железа при контакте воды с воздухом.

Высокое содержание в подземных водах железа часто сопровождается и повышенным содержанием марганца (Mn) – до 0,5–1,0 мг/л и более, при уровне ПДК 0,1 мг/л. В отличие от железа, процесс удаления из воды марганца (деманганация) является более сложным и требует больших материальных затрат.

Следует отметить, что железо (Fe) и марганец (Mn), содержащиеся в пресных подземных водах, влияют лишь на *органолептические* показатели их качества. Они придают воде неприятный привкус, формируют ее повышенные цветность и мутность, обуславливают появление на санитарной технике цветного осадка, но не являются опасными для здоровья. В отличие от них такие компоненты, как фтор (F), барий (Ba), бор (B) и кремний (Si), которые также нередко присутствуют в пресных подземных водах в повышенных концентрациях, характеризуются уже *санитарно-токсикологическими показателями вредности*, т. е. способны оказывать негативное влияние на здоровье человека. По этому лимитирующему показателю они имеют 2-й класс опасности [3].

Повышенное содержание фтора (F) – до 4,0–5,0 мг/л и более – нередко фиксируется в Центральной Беларуси в глубокозалегающих водоносных горизонтах (главным образом в верхнепротерозойском). В питьевых водах его содержание нормируется на уровне 1,5 мг/л. Повышенное содержание фтора в питьевых водах вызывает флюороз костей, пятнистость зубной эмали, развитие сердечно-сосудистых заболеваний, нарушение работы щитовидной железы. Вместе с тем негативное влияние на здоровье человека оказывает и чрезмерно низкое содержание в питьевой воде фтора (менее 0,7 мг/л). Это вызывает кариес зубов. И такое низкое содержание фтора в пресных подземных водах является характерной геохимической особенностью подземной гидросферы Беларуси, как, впрочем, и многих других стран зоны гумидного климата. Дефицит фтора фиксируется более чем в 70 % всех артезианских скважин водоснабжения на территории Беларуси [8], что предопределяет необходимость осуществления в стране профилактических санитарно-гигиенических мероприятий (применение зубных паст с фтором и др.).

В подземных водах девонских отложений, которые широко эксплуатируются во многих районах Центральной Беларуси, и особенно в Северной Беларуси, часто фиксируется повышенное содержание бария (Ba) – до 0,5–1,0 мг/л (в отдельных случаях до 2,0–4,0 мг/л). До 2022 г. содержание данного компонента в питьевых водах нормировалось на уровне 0,1 мг/л. Превышение этого уровня наблюдалось в большом числе скважин, что существенно затрудняло работу даже больших групповых водозаборов (например, г. Витебска). Постановлением Совета Министров Республики Беларусь (от 29.11.2022 № 829) допустимое содержание бария было повышено до 0,7 мг/л. Однако и этот уровень ПДК в настоящее время превышает в некоторых скважинах. Повышение содержания бария в питьевых водах обуславливает риск развития заболеваний сердечно-сосудистой системы.

Кремний (Si) в питьевых водах нормируется на уровне 10,0 мг/л. Высокое его содержание может быть причиной мочекаменной и желчнокаменной болезней, а также способствует развитию остеопороза. Ранее определение этого компонента в подземных водах, используемых для водоснабжения, выполнялось сравнительно редко, и он не рассматривался в качестве проблемного. В настоящее время его повышенное содержание в подземных водах, достигающее иногда 20–30 мг/л [10], достаточно часто фиксируется при выполнении детальных химических анализов этих вод, и это в значительной степени осложняет их использование в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Следует отметить, что, в отличие от железа и марганца, повышение содержания которых может быть удалено и удаляется из воды сравнительно простыми способами обезжелезивания и деманганации, удаление из воды фтора, бария и кремния является гораздо более сложной технологической задачей и требует гораздо больших материальных затрат. В ряде случаев водопользователи вынуждены отказываться от эксплуатации скважин, в воде которых зафиксировано повышенное содержание фтора.

Состояние подземных вод, в частности подземных вод первого от поверхности безнапорного водоносного горизонта – грунтовых вод, их уровенного режима и химического состава оказывает очень большое влияние на поверхностные воды, во многом определяя условия их водного питания (особенно в меженные периоды), а также формирования химического состава речных вод. В условиях Беларуси

среднегодовой речной сток на 60 % формируется за счет подземного питания, а в меженные периоды водное питание рек практически полностью обеспечивается подземными водами [11]. Исключительно за счет подземных вод осуществляется водное питание таких уникальных и ценных в культурном отношении природных объектов, как *родники*. Поэтому истощение ресурсов подземных вод под влиянием как природных (потепление климата и малое количество атмосферных осадков), так и техногенных (интенсивный водоотбор подземных вод, осушительные мелиорации и др.) факторов, неизбежно приводит к нарушению гидрологического режима рек, родников и других поверхностных водных объектов, состояние которых уже непосредственно влияет на уровень комфортности среды обитания человека.

Реки, озера и водохранилища являются областью разгрузки подземных вод, формирующихся на площади их водосборов, поэтому все загрязнения, поступающие в подземные воды, в конечном итоге попадают в эти поверхностные водные объекты. Особенно активно с подземным стоком в реки, озера и водохранилища поступают такие биогенные компоненты, как азот (в форме NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+) и калий (K^+), которые способствуют, например, бурному развитию сине-зеленых водорослей («цветение» воды) и процессам активной эвтрофикации этих водоемов в целом. Вследствие высоких современных уровней загрязнения грунтовых вод, значительными уровнями контаминации характеризуются и воды многих родников, так как их водное питание формируется исключительно за счет подземных вод. По результатам выполненных в 2018–2023 гг. исследований и опробования на территории Беларуси 286 родниковых источников, превышение уровня ПДК по нитратам зафиксировано в 20 % из них. В отдельных родниках на территории Центральной Беларуси содержание нитратов (NO_3^-) достигало 120–190 мг/л, т. е. в 2,7–4,2 раза превышало уровень ПДК в питьевых водах. Это, например, родник в г. Марьина Горка Пуховичского района Минской области ($\text{NO}_3^- = 150,0$ мг/л), родник в д. Теляково Узденского района Минской области (150 мг/л), родник в аг. Поплавы Березинского района Минской области (190 мг/л) [12].

Таким образом, неблагоприятное геозкологическое состояние поверхностных водотоков и водоемов (рек, озер, водохранилищ и родников), формирующееся в результате поступления в них с подземным стоком загрязненных подземных вод, также оказывает негативное влияние на уровень комфортности среды обитания человека.

К числу важнейших гидрогеологических факторов, влияющих на уровень комфортности среды обитания человека, относится уровенный режим грунтовых вод. Глубина залегания грунтовых вод и его изменение во времени часто оказывают непосредственное влияние на режим увлажнения почв (в первую очередь на участках неглубокого залегания грунтовых вод и на мелиорируемых землях) и, как следствие, на условия произрастания сельскохозяйственных культур и лесной растительности. Аномально низкие уровни грунтовых вод являются также причиной возникновения пожаров на торфяниках, поражения болезнями и вредителями лесной растительности и ее усыхания. При снижении уровней грунтовых вод резко ухудшаются условия эксплуатации источников нецентрализованного водоснабжения (колодцев и неглубоких скважин). В ряде случаев они полностью пересыхают. Так как грунтовые воды являются важнейшим компонентом водного питания рек и озер, снижение уровней грунтовых вод всегда сопровождается снижением уровней и поверхностных вод, обмелением рек и озер. Помимо экологических проблем это может создавать значительные трудности и для судоходства.

В то же время резкий подъем уровней грунтовых вод, который может происходить как по естественным (аномально влажные годы), так и по техногенным (подпор и подтопление в зоне влияния водохранилищ, заболачивание земель вследствие просадок поверхности над подземными горными выработками и др.) причинам, также может иметь негативные последствия, ухудшающие уровень комфортности среды обитания человека. Критический подъем уровней грунтовых вод, приводящий к переувлажнению почвы, резко ухудшает условия произрастания сельскохозяйственных культур и лесной растительности (вплоть до ее гибели), требует проведения на этой территории дополнительных мелиоративных работ. Подтопление подвальных помещений и фундаментов резко ухудшает условия эксплуатации зданий и сооружений. Все это в совокупности оказывает негативное влияние и на уровень комфортности среды обитания человека.

Заключение. Подземные воды, являясь одним из важнейших компонентов природной среды, способны оказывать существенное влияние на степень комфортности среды обитания человека. Подобное влияние по своему характеру может быть как положительным, так и негативным, непосредственным или косвенным.

Важным аспектом воздействия гидрогеологических условий региона на степень благоприятности территории для жизнедеятельности населения является наличие на территории Центральной Беларуси существенных ресурсов пресных подземных вод питьевого качества. В связи с этим актуальной является проблема обеспечения их рационального использования в условиях все возрастающего техногенного воздействия. Так, в пределах Центрального белорусского региона наиболее существенными гидрогеологическими факторами, определяющими пригодность среды обитания для человека в условиях техногенной нагрузки, являются:

– расширение хозяйственного производства в регионе, приводящее к росту объемов изъятия подземных вод в местах сосредоточенного водоотбора, истощению их запасов, формированию депрессионных воронок, негативно воздействующих на состояние поверхностной гидрографической сети;

– антропогенное, главным образом коммунально-бытовое, сельскохозяйственное, промышленное загрязнение неглубокозалегающих грунтовых вод, эксплуатируемых колодцами, а также напорных подземных вод, эксплуатируемых артезианскими скважинами одиночных и групповых водозаборов в населенных пунктах и на предприятиях нитратами (NO_3^-), аммонием (NH_4^+), нефтепродуктами, тяжелыми металлами и другими опасными компонентами;

– поверхностные водные объекты (реки, озера, водохранилища, родники), являющиеся областью разгрузки подземных вод, формирующихся на площади их водосборов, также подвергаются загрязнению, что приводит к ухудшению их геоэкологического состояния и негативно сказывается на комфортности среды обитания человека.

Кроме этого, на качество пресных подземных вод как основного источника хозяйственно-питьевого водоснабжения населения негативное влияние может оказывать не только антропогенное загрязнение, но и ряд природных гидрогеохимических особенностей этих вод. Часто в них фиксируются превышающие ПДК концентрации железа ($\text{Fe}_{\text{общ.}}$), марганца (Mn), фтора (F), бора (B) и других компонентов, некоторые из которых характеризуются санитарно-токсикологическими показателями вредности. Это обуславливает необходимость применения дополнительных мер по улучшению качества используемых подземных вод и требует значительных материальных затрат.

Важным гидрогеологическим фактором формирования благоприятных или неблагоприятных условий среды обитания человека является уловенный режим грунтовых вод. Глубина залегания грунтовых вод и ее изменение во времени оказывают непосредственное влияние на режим увлажнения почв, условия произрастания сельскохозяйственных культур и лесной растительности, развитие ряда опасных геологических процессов, таких как подтопление, заболачивание, суффозия.

Список использованных источников

1. Пашкевич В. Гидроминеральные ресурсы / В. Пашкевич, О. Васнева // Наука и инновации. – 2025. – № 3 (264). – С. 11–15.
2. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество (за 1995–2023 гг.). – Минск : Минприроды Респ. Беларусь ; Минздрав Респ. Беларусь, 1995–2024.
3. Об утверждении гигиенических нормативов (Показатели безопасности питьевой воды) : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 25 янв. 2021 г. № 37 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система. – С. 187–225. – URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=c22100037> (дата обращения: 07.05.2025).
4. Водный Кодекс Республики Беларусь : 30 апр. 2014 г. № 149-3 : принят Палатой представителей 2 апр. 2014 г. : одобр. Советом Респ. 11 апр. 2014 г. // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система. – URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=hk1400149> (дата обращения: 07.05.2025).
5. Пашкевич, В. И. Геоэкологическое состояние подземных вод Минского региона / В. И. Пашкевич // Состояние окружающей среды и природопользование города Минска / Е. В. Комаровская [и др.] ; под ред. М. Г. Герменчук, А. Н. Боровикова, М. Л. Амбражевича. – Минск : БГУ, 2007. – С. 58–62.
6. О Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 22 февр. 2022 г. № 91 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система. – URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=c22200091> (дата обращения: 07.05.2025).
7. Прогноз состояния подземных вод / В. Г. Жогло, В. И. Пашкевич, В. С. Хомич, Е. М. Черевач // Прогноз состояния природной среды Беларуси на период до 2035 года / В. М. Байчоров, Ж. В. Бакарикова, И. М. Богдевич [и др.] ; под общ. ред. В. С. Хомича. – Минск : Беларус. навука, 2022. – С. 99–126.
8. Кудельский, А. В. Региональная гидрогеология и геохимия подземных вод Беларуси / А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 271 с.
9. Крайнов, С. Р. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С. Р. Крайнов, Б. Н. Рыженко, В. М. Швец ; отв. ред. Н. П. Лаверов. – М. : ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
10. Пашкевич, В. И. Качество пресных подземных вод Беларуси / В. И. Пашкевич // Минерально-сырьевые ресурсы Беларуси 2002: состояние и перспективы освоения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, РУП «Белгеология», Бел. науч.-исслед. геологоразвед. ин-т. – Минск : БелНИГРИ, 2002. – С. 170–173.
11. Полезные ископаемые Беларуси: к 75-летию БелНИГРИ / редкол.: П. З. Хомич (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2002. – 528 с.
12. Пашкевич, В. И. Гидрогеохимическое разнообразие родниковых источников на территории Беларуси / В. И. Пашкевич // Актуальные вопросы эффективного и комплексного использования водных ресурсов», приуроченной ко Всемирному дню водных ресурсов : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 22–24 марта 2023 г. / М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, РУП «ЦНИИКИВР». – Минск : Нац. б-ка Беларуси, 2023. – С. 62–64.

References

1. Pashkevich V., Vasneva O. *Gidromineral'nye resursy* [Hydromineral resources]. *Nauka i innovatsii = Science and Innovations*, 2025, no. 3 (264), pp. 11–15. (in Russian)
2. *Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Vodnye resursy, ikh ispol'zovanie i kachestvo (za 1995–2023 gg.)* [State water cadastre. Water resources, their use and quality (for 1995–2023)]. Minsk, 1995–2024. (in Russian)
3. *Ob utverzhdenii gigienicheskikh normativov (Pokazateli bezopasnosti pit'evoy vody)* [On approval of hygiene standards (Drinking water safety indicators)], pp. 187–225. Available at: <https://etalonline.by/document/?regnum=c22100037> (accessed 7 May 2025).
4. *Vodnyy Kodeks Respubliki Belarus'* [Water code of the Republic of Belarus]. Available at: <https://etalonline.by/document/?regnum=hk1400149> (accessed 7 May 2025).
5. Pashkevich V. I. Geocological state of groundwater in the Minsk region. *Sostoyanie okruzhayushchei sredy i prirodopol'zovanie goroda Minska* [State of the environment and nature management of the city of Minsk]. Minsk, BGU Publ., 2007, pp. 58–62. (in Russian)
6. National Strategy for Water Resources Management in the Conditions of Climate Change for the period up to 2030. Available at: <https://etalonline.by/document/?regnum=c22200091> (accessed 7 May 2025).
7. Zhoglo V. G., Pashkevich V. I., Khomich V. S., Cherevach E. M. Forecast of the state of groundwater. *Prognoz sostoyaniya prirodnoi sredy Belarusi na period do 2035 goda* [Forecast of the state of the natural environment of Belarus for the period up to 2035]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2022, pp. 99–126. (in Russian)
8. Kudelsky A. V., Pashkevich V. I. *Regional'naya gidrogeologiya i geokhimiya podzemnykh vod Belarusi* [Regional hydrogeology and geochemistry of groundwater in Belarus]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014, 217 p. (in Russian)
9. Kraynov S. R., Ryzhenko B. N., Shvets V. M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters. Theoretical, Applied and Environmental Aspects]. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2012, 672 p. (in Russian)
10. Pashkevich V. I. *Kachestvo presnykh podzemnykh vod Belarusi* [Quality of fresh groundwater in Belarus]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Mineral'no syr'evye resursy Belarusi 2002: sostoyanie i perspektivy osvoeniya"* [Proc. of the Int. sci. conf. "Mineral resources of Belarus 2002: status and development prospects"]. Minsk, BelNIGRI Publ., 2002, pp. 170–173. (in Russian)
11. *Poleznye iskopaemye Belarusi: k 75-letiyu BelNIGRI* [Minerals of Belarus: to the 75th anniversary of BelNIGRI]. Minsk, Adukatyia i vykhavanne Publ., 2002, 528 p. (in Russian)
12. Pashkevich V. I. *Gidrogeokhimicheskoe raznoobrazie rodnikovykh istochnikov na territorii Belarusi* [Hydrogeochemical diversity of spring sources in Belarus]. *Sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aktual'nye voprosy effektivnogo i kompleksnogo ispol'zovaniya vodnykh resursov", priurochennoi ko Vsemirnomu dnyu vodnykh resursov* [Proc. of the Int. sci. conf. "Topical issues of efficient and integrated use of water resources", dedicated to the World Water Day]. Minsk, National Library of Belarus, 2002, pp. 62–64. (in Russian)

Информация об авторах

Пашкевич Василий Иванович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: v.i.pashkevich@tut.by

Кухарик Евгений Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией современной геодинамики и палеогеографии, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: shzhk@mail.ru

Кухарик Анна Михайловна – инженер, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: anyahomich@mail.ru

Information about the authors

Vasiliy I. Pashkevich – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: v.i.pashkevich@tut.by

Evgeniy A. Kukharik – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Head of the Lab of Modern Geodynamics and Paleogeography, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: shzhk@mail.ru

Anna M. Kukharik – Engineer, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: anyahomich@mail.ru

**ГЕОТЕХНОЛОГИИ. ДОБЫЧА, ПЕРЕРАБОТКА
И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ**
*GEOTECHNOLOGY. EXTRACTION, PROCESSING
AND THE USE OF SOLID FUEL MINERALS*

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-138-147>
УДК 622.271.6

*Поступила в редакцию 25.03.2025
Received 25.03.2025*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ
СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ САПРОПЕЛЯ ИЗ-ПОД ТОРФА**

**Б. В. Курзо, В. Б. Кунцевич, О. М. Гайдукевич, А. Ю. Татков,
А. А. Молочко, Т. И. Макаренко, И. В. Агейчик, Л. П. Калилец**

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных работ по скважинной гидродобыче сапропеля, залегающего под торфом. Исследования проведены на торфяных месторождениях Гала-Ковалевское и Кобылицкое, которые расположены в Пуховичском районе Минской области. В работе учтены результаты теоретических расчетов, выполненные авторами ранее, что позволило произвести выбор серийно выпускаемого оборудования для проведения исследований в полевых условиях. При этом в расчетах приняты реальные исходные данные, сложившиеся на опытном участке торфяного месторождения Гала-Ковалевское.

Установлено, что при добыче сапропеля карбонатного типа влажностью 76,3 % производительность высоконапорной мотопомпы Denzel PX-50H при подаче воды в сапропелевую залежь равна 23 м³/ч, что соответствует производительности всасывающей мотопомпы DDE PTR 50K. При добыче сапропеля органического типа влажностью 91,0 % производительность мотопомпы Denzel PX-50H не должна превышать 18–20 м³/ч.

Выявлено, что скорость течения воды в нагнетающем шланге диаметром 50 мм при подаче ее в емкость составляет 3,6 м/с, в сапропелевую залежь – 3,2 м/с. Скорость течения сапропелевой пульпы в транспортирующем шланге равна 3,1 м/с.

Показано, что избыточное давление в сапропеле, создаваемое высоконапорной мотопомпой Denzel PX-50H, составляет 6 бар, что обеспечивает размыв сапропелевой залежи на расстоянии 1,50 м от скважины. Расчетным путем установлено, что критическое динамическое давление, необходимое для разрушения карбонатного сапропеля, составляет 0,13 МПа. Учитывая давление, создаваемое мотопомпой Denzel PX-50H, предельное расстояние разрушения равно 1,87 м.

Представленные расчеты позволяют произвести выбор оборудования с другими техническими характеристиками, удовлетворяющими условиям гидродобычи сапропеля на месторождения различного типа.

Ключевые слова: торфяные месторождения; сапропель; скважинная гидродобыча; оборудование; опытная установка; основные показатели.

Для цитирования. Курзо Б. В., Кунцевич В. Б., Гайдукевич О. М., Татков А. Ю., Молочко А. А., Макаренко Т. И., Агейчик И. В., Калилец Л. П. Экспериментальные исследования технологии скважинной гидродобычи сапропеля из-под торфа // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 138–147.

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE BOREHOLE HYDRAULIC
EXTRACTION TECHNOLOGY OF SAPROPEL FROM UNDER PEAT**

**B. V. Kurzo, V. B. Kuntsevich, O. M. Gaidukevich, A. Yu. Tatkov,
A. A. Molochko, T. I. Makarenko, I. V. Ageichik, L. P. Kalilets**

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

Abstract. The article presents the results of experimental work on the borehole hydraulic production of sapropel located under peat. The researches was carried out at Gala-Kovalevskoye and Kobylitskoye peat deposits located in Pukhovichi district of Minsk region. The work takes into account the results of theoretical calculations previously performed by the authors, which made it possible to select commercially available equipment for research conducting in field conditions. In this case, the calculations were based on real initial data that were generated at the experimental site of Gala-Kovalevskoye peat deposit.

It was established during the sapropel extraction of carbonate type with the moisture content of 76.3 %, the productivity of Denzel PX-50H high-pressure motor pump at water supply into the sapropel deposit is equal to 23 m³/h that corresponded to the productivity the suction of DDE PTR 50K motor pump. When extracting sapropel of organic type with a moisture content of 91.0 %, the capacity of Denzel PX-50H motor pump should not exceed 18–20 m³/h.

It was found that the flow rate of water in a 50 mm diameter injection hose when feeding it into a container is 3.6 m/s, and into a sapropel deposit – 3.2 m/s. The flow rate of the sapropel pulp in the transport hose is 3.1 m/s.

It is shown that the excess pressure in sapropel created by Denzel PX-50H high-pressure motor pump is 6 bar, which ensures the erosion of the sapropel deposit at a distance of 1.50 m from the well. It was determined by calculation that the critical dynamic pressure required to destroy carbonate sapropel is 0.13 MPa. Taking into account the pressure created by Denzel PX-50H motor pump, the maximum destruction distance is 1.87 m.

The presented calculations allow us to select equipment with other technical characteristics that meet the conditions of hydraulic extraction of sapropel in deposits of various types.

Keywords: peat deposits; sapropel; borehole hydraulic mining; equipment; pilot plant; main indicators.

For citation. Kurzo B. V., Kuntsevich V. B., Gaidukevich O. M., Tatkov A. Yu., Molochko A. A., Makarenko T. I., Ageichik I. V., Kalilets L. P. Experimental studies of the borehole hydraulic extraction technology of sapropel from under peat. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 138–147.

Введение. Скважинная гидродобыча сапропеля базируется на размыве отдельных генетических слоев залежи тонкими струями воды высокого давления с одновременным засасыванием полученной пульпы и дальнейшим ее транспортированием по трубопроводу в отстойник (специальные контейнеры) для удаления избыточной влаги. В 2023 г. сотрудниками лаборатории использования и охраны торфяных и сапропелевых месторождений разработаны теоретические основы и определены основные показатели применения такого транспортирования для добычи сапропеля, погребенного под слоем торфа [1]. В 2024 г. на опытных участках торфяных месторождений Гала-Ковалевское и Кобылицкое, которые расположены в Пуховичском районе Минской области, проведены экспериментальные работы по установлению возможности и целесообразности применения технологии СГДС, залегающего под слоем торфа [2]. На месторождении Гала-Ковалевское для полевых исследований определена площадка размером 40 м × 500 м, примыкающая с юга к магистральному каналу. В настоящее время торф на ней не добывается ввиду его малой мощности и подстилания сапропелем, наличие которого снижает несущую способность залежи. Зондирование торфяной и сапропелевой залежи на площадке произведено по двум поперечникам с расстоянием между пикетами 50 м (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения пунктов зондирования для определения мощности торфа и сапропеля на опытном участке

Fig. 1. Scheme of probing points location for peat and sapropel thickness determination at the experimental area

Средняя мощность торфа на исследованной площади составила 0,86 м при изменении от 0,5 до 1,8 м, а средняя мощность сапропеля – 1,3 м при изменении от 0,6 до 2,8 м. Для испытания опытной установки по добыче сапропеля из-под торфа намечены пункты вблизи пикетов № 1–4 и 1–5, которые расположены на расстоянии 10 м от источника воды – магистрального канала и имеют малую мощность торфа (0,8–1,1 м) и повышенную мощность сапропеля (1,2–1,7 м).

На торфяном месторождении Кобылицкое в начале 2000-х годов выполнено предварительное осушение, однако в дальнейшем подготовка месторождения для добычи фрезерного торфа была прекращена и в настоящее время массив находится практически в естественном состоянии. Средняя мощность торфа на опытном участке составила 1,7 м, сапропеля – 1,8 м. Забор воды для подачи ее в скважину осуществляли из картового канала, который был полностью заполнен.

В намеченных пунктах на каждом месторождении через 0,25 м на всю глубину отобрали образцы торфа и сапропеля для определения их общетехнических свойств (табл. 1).

Таблица 1. Качественная характеристика торфа и сапропеля на опытных участках (средние значения)

Table 1. Qualitative characteristics of peat and sapropel in experimental areas (average values)

Показатель	Месторождение			
	Гала-Ковалевское		Кобылицкое	
Залежь	Торфяная	Сапропелевая	Торфяная	Сапропелевая
Тип	Низинная	Карбонатная	Переходная	Органическая
Степень разложения, %	30	–	30	–
Влажность, %	85,0	76,3	90,0	91,0
Зольность, %	8,0	43,5	4,6	20,0

Методы исследований включают экспериментальные работы в полевых условиях, лабораторные исследования, математическую обработку полученных данных.

Результаты и их обсуждение. Эффективность исследований в полевых условиях в значительной степени зависит от оборудования, которое используется при выполнении технологических операций. В нашем случае расчет параметров установки для гидродобычи сапропеля осуществлен с учетом реальных условий, сложившихся на опытном участке торфопредприятия Гала-Ковалевское: расстояние от скважин до водоисточника (магистрального канала) – 10 м, геометрическая разность высот между урезом воды в канале и входным патрубком мотопомпы – 4, геометрическая разность высот между выходным патрубком высоконапорной мотопомпы и центральным слоем сапропелевой залежи – 3,5, расстояние от выходного патрубка всасывающей мотопомпы до отстойника (специальных контейнеров) – 20 м. Диаметры всасывающего и нагнетающего шлангов для воды, а также всасывающего и транспортирующего шлангов для сапропелевой пульпы – 50 мм, относительная влажность сапропеля в залежи – 76,3 %, относительная влажность пульпы (принятая) – 94,0 %. По результатам расчета опытная установка укомплектована следующим серийно выпускаемым оборудованием: высоконапорной мотопомпой Denzel PX-50H, предназначенной для подачи воды под давлением в сапропель, мотопомпой DDE PTR 50K для всасывания полученной пульпы, грунтозаборным устройством, шлангами из ПВХ напорно-всасывающими Argo CE и ФУД-П, плоским шлангом-пульпопроводом из ПВХ (рис. 2).



Рис. 2. Оборудование и изделия для добычи сапропеля из-под торфа на опытном участке

Fig. 2. Equipment and products for the extraction of sapropel from under peat at the experimental area

Компоновочная схема оборудования для проведения экспериментальных работ показана на рис. 3. Техническая характеристика мотопомп приведена в табл. 2.

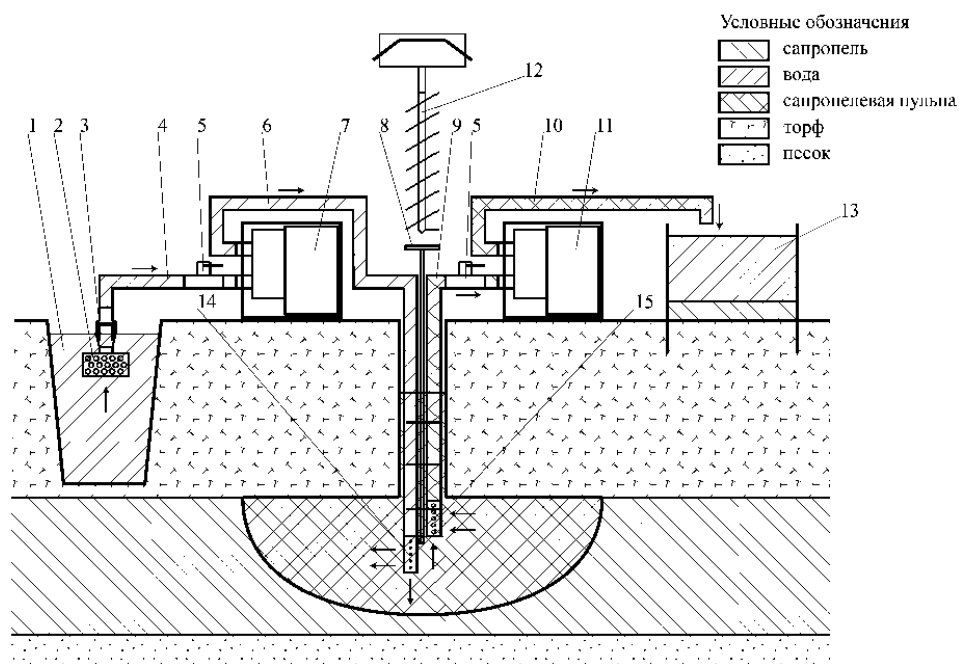


Рис. 3. Схема установки по скважинной гидродобыче сапропеля на опытном участке:

1 – водоем; 2 – всасывающий оголовок; 3 – обратный клапан управляемый; 4 – всасывающий шланг для воды; 5 – шаровый кран; 6 – нагнетающий шланг для воды; 7 – мотопомпа высоконапорная Denzel PX-50H; 8 – управляющая штанга; 9 – всасывающий шланг для пульпы; 10 – транспортирующий пульпопровод; 11 – мотопомпа грязевая DDE PTR50K; 12 – бензиновый мотобур Fubag FPB71; 13 – геотекстильный контейнер; 14 – устройство для размыва сапропеля; 15 – устройство для забора сапропелевой пульпы

Fig. 3. Scheme of the installation for borehole hydraulic extraction of sapropel at the experimental area:

1 – reservoir; 2 – suction head; 3 – controlled check valve; 4 – water suction hose; 5 – ball valve; 6 – water discharge hose; 7 – Denzel PX-50H high-pressure motor pump; 8 – control rod; 9 – pulp suction hose; 10 – pulp transport pipeline; 11 – DDE PTR50K mud motor pump; 12 – Fubag FPB71 gasoline motor drill; 13 – geotextile container; 14 – device for washing out sapropel; 15 – device for collecting sapropel pulp

Таблица 2. Техническая характеристика мотопомп

Table 2. Technical characteristics of motor pumps

Показатель	Модель мотопомпы	
	Denzel PX-50H	DDE PTR 50K
Назначение	Для чистой воды	Для сильно загрязненной воды
Тип двигателя	Бензиновый, четырехтактный, воздушного охлаждения	
Мощность двигателя, кВт	5,2	4,1
Максимальный напор, м	65	20
Максимальная производительность, м ³ /ч	36	30
Расход топлива, л/ч	2,0	1,9
Масса, кг	24	48

Приоритетными вопросами исследований являлись производительность высоконапорной и грязевой мотопомп, скорость течения воды и сапропелевой пульпы в нагнетательном и транспортирующем шлангах соответственно, размер зоны размыва сапропелевой залежи, давление, создаваемое высоконапорной мотопомпой в залежи, содержание в пульпе сухого вещества.

Производительность высоконапорной мотопомпы и скорость течения воды в нагнетающем шланге определяли следующим образом. К входному патрубку высоконапорной мотопомпы Denzel PX-50H присоединяли шланг Argo CE длиной 10 м и осуществляли забор воды из магистрального канала. К выходному патрубку присоединяли шланг длиной 5 м, из которого вода свободно выливалась в мерную емкость.

Производительность определяли по формуле

$$Q_b = \frac{V}{t}, \quad (1)$$

где Q_b – производительность мотопомпы при свободном течении воды, л/с; V – объем емкости, л; t – время наполнения емкости, с.

Для определения производительности мотопомпы при подаче воды в залежь сапропеля мотобуром осуществляли проходку скважины на всю глубину залегания торфа и сапропеля, и в нее опускали устройство для размыва примерно до центрального слоя сапропеля (количество открытых отверстий в устройстве – 10). Из предварительно наполненной емкости мотопомпой осуществляли забор воды и подачу ее в скважину. Производительность рассчитывали по формуле (1) с той разницей, что в первом случае емкость наполняли водой, во втором – опорожняли.

Скорость течения воды рассчитывали по формуле

$$v = \frac{4Q_b}{\pi D^2}, \quad (2)$$

где v – скорость течения воды м/с; D – внутренний диаметр шланга, м;

Пульпу, полученную в результате размыва сапропелевой залежи, мотопомпой DDE PTR 50K через заборное устройство, всасывающий шланг и входной патрубок извлекали из скважины и посредством плоского шланга из ПВХ, закрепленного на выходном патрубке, транспортировали в контейнеры различной конструкции для сушки (рис. 4).



Рис. 4. Разлив сапропелевой пульпы в контейнеры для сушки

Fig. 4. Pouring sapropel pulp into containers for drying

Производительность всасывающей мотопомпы и скорость течения пульпы в транспортирующем шланге определяли по формулам (1) и (2). Полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3. Основные характеристики мотопомп при работе на опытном участке в различных условиях

Table 3. Main characteristics of motor pumps during operation at the experimental area under differential conditions

Показатель	Модель мотопомпы	Подача		
		воды в емкость	воды в сапропелевую залежь	пульпы в контейнер
Производительность, м ³ /ч	Denzel PX-50H	26	23	–
	DDE PTR 50K	–	–	22
Скорость течения, м/с	Denzel PX-50H	3,6	3,2	–
	DDE PTR 50K	–	–	3,1

Следует отметить, что при расчете технических параметров мотопомп значения исходных данных качественной характеристики сапропеля, необходимые для расчета, принимали применительно к торфяному месторождению Гала-Ковалевское (тип сапропеля – карбонатный, влажность – 76,3 %). Вследствие этого на опытном участке данного месторождения мотопомпы работали практически синхронно – производительность мотопомпы Denzel PX-50H соответствовала производительности мотопомпы DDE PTR 50K. На торфяном месторождении Кобылицкое сапропель относится к органическому типу, а средняя влажность равна 91,0 %. В данном случае производительность нагнетательной мотопомпы превышала производительность всасывающей мотопомпы, так как количество воды, подаваемое в скважину, значительно больше расчетного значения (3,4 т воды на 1 т сапропеля против необходимых 1,9 т). В результате часть сапропелевой пульпы из скважины выливалась на поверхность торфяной залежи. Регулировка производительности мотопомп осуществляется путем изменения числа оборотов, однако это не всегда приемлемо, так как при снижении числа оборотов уменьшается и напор, который может оказаться недостаточным для размыва сапропеля. При добыче сапропеля органического типа производительность нагнетающей мотопомпы должна находиться в пределах 18–20 м³/ч, а производительность всасывающей мотопомпы составлять 22–23 м³/ч.

Для определения избыточного давления в сапропеле мотобуром отрывали скважину и опускали в нее устройство для размыва сапропеля, примерно до его центрального слоя. Воду в устройство нагнетали при максимальных оборотах вала двигателя.

Расчет избыточного давления осуществляли по формуле

$$H_0 = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 10^5}{\rho_w q} + H_T + h_1 - h_2, \quad (3)$$

где H_0 – максимальный напор, развиваемый мотопомпой (принимается по технической характеристике мотопомпы), м; P_2 – избыточное давление в сапропелевой залежи, бар; P_1 – давление в открытом водоеме, бар; ρ_w – плотность воды, кг/м³; q – ускорение свободного падения, м/с²; H_T – потери напора на трение и местные сопротивления, м; h_1 – геометрическая разность высот между поверхностью водоема и входным патрубком, м; h_2 – геометрическая разность высот между выходным патрубком мотопомпы и центральным слоем сапропелевой залежи, м.

Потери напора на трение и местные сопротивления находили по формуле

$$H_T = (K_T l_0) / D [v_{cm}^2 / (2q)], \quad (4)$$

где $K_T = 0,032$ – коэффициент трения [3]; l_0 – общая длина шлангов, м; D – внутренний диаметр шлангов, м.

В нашем случае при подаче воды из магистрального канала в сапропель элементы трубопровода, создающие условия для местных сопротивлений, практически отсутствуют (за исключением угла изменения потока при входе и выходе из мотопомпы), поэтому потерей напора на преодоление местных сопротивлений можно пренебречь [4].

$$H_T = (0,032 \cdot 15) / 0,05 [3,2^2 / (2 \cdot 9,81)] \approx 5 \text{ (м)}.$$

Преобразовав формулу (3) и подставив известные значения ($P_1 = 1$ бар, $\rho_w = 1000$ кг/м³, $q \approx 10$ м/с²), получим:

$$P_2 = (H_0 + 10P_1 - H_T - h_1 + h_2) / 10 = (65 + 10 - 5 - 4 + 3,5) / 10 \approx 7 \text{ (бар)}.$$

Согласно технической характеристике мотопомпы Denzel PX-50H при максимальном напоре (65 м) производительность мотопомпы по воде равна 36 м³/ч (см. табл. 2). Производительность по результатам испытаний на опытном участке при подаче воды в сапропелевую залежь составила 23 м³/ч. Из формулы полезной мощности фактический напор

$$H'_0 = N_n / \rho_w q Q_c, \quad (5)$$

где N_n – полезная мощность мотопомпы, Вт; Q_c – производительность мотопомпы при подаче воды в сапропелевую залежь, м³/с (см. табл. 3);

$$N_n = N_n K_n, \quad (6)$$

где N_n – необходимая мощность мотопомпы (см. табл. 2), кВт; $K_n = 0,75$ – коэффициент полезного действия мотопомпы [4].

$$N_n = 5,2 \cdot 0,75 = 3,9 \text{ (кВт)},$$

$$H'_0 = 3900 / 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,0065 \approx 61 \text{ (м)}.$$

В этом случае давление, создаваемое высоконапорной мотопомпой,

$$P'_2 = 61 + 10 - 5 - 4 + 3,5/10 = 6 \text{ бар}.$$

При разработке методики проведения полевых исследований планировалось размер зоны размыва установить путем набора значений влажности сапропеля в зависимости от расстояния точки отбора пробы до скважины. Однако в процессе испытаний был подобран более простой и достоверный способ: с шагом 0,5 м осуществляли бурение скважин и фиксировали наиболее удаленную скважину, в которой появлялась сапропелевая пульпа. Таким образом, было установлено, что при данных конкретных условиях размыв сапропеля происходит в радиусе 1,50 м от скважины, в которую высоконапорной мотопомпой подается вода. Разработка сапропелевой залежи по технологии СГДС в промышленных масштабах предполагает использование более производительного оборудования, соответственно увеличится и зона размыва.

Во время полевых исследований проведен опыт по применению рассмотренного способа для добычи торфа. Результат получился отрицательным, так как структура торфа более прочная, чем сапропеля и величина напора мотопомпы Denzel PX-50H (65 м) оказалась недостаточной для превращения торфяной залежи в пульпу. В некотором роде аналогом СГДС является гидроторф, в основу которого положено разрушительное действие мощной водяной струи с давлением от 12 до 15 бар, превращающее торфяную залежь в гидромассу. Напор в этом случае составлял 120–150 м, а мощность электродвигателя привода центробежного насоса достигала значения 500 кВт [5].

В настоящее время добычу сапропеля осуществляют экскаваторным способом, который предполагает полное удаление слоя торфа над сапропелем, вследствие чего вскрышные работы оказывают значительное влияние на себестоимость готовой продукции. СГДС основан на подаче воды в скважины, расположенные в определенном порядке на разрабатываемой площади, поэтому объем вскрышных работ значительно меньше, что подтверждается расчетом.

Объем извлеченного торфа и сапропеля из одной скважины

$$V_1 = \frac{\pi D_{ш}^2}{4} h, \quad (7)$$

где V_1 – объем извлеченного торфа, м³; $D_{ш}$ – диаметр шнека, м; h – глубина скважины, м.

$$V_1 = \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} \cdot 2,3 \approx 0,072 \text{ (м}^3\text{)}.$$

На выбывших из эксплуатации полях, на которых ранее добывали фрезерный торф, в потери относится площадь, занятая осушительной сетью. Коэффициент использования площади в этом случае равен 0,95 [6]. Учитывая, что радиус размыва сапропелевой залежи на опытном участке составляет 1,50 м, площадь зоны размыва

$$F = \pi R^2 = 3,14 \cdot 1,5^2 \approx 7,1 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Количество скважин на 1 га нетто

$$n = (10\,000 \cdot 0,95) : 7,1 \approx 1338 \text{ (шт.)}.$$

Объем извлеченного торфа с 1 га

$$v = 1138 \cdot 0,072 \approx 96 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Если принять среднестатистическую глубину оставшегося слоя торфа 0,7 м [7], при экскаваторном способе добычи его объем составит

$$v = 10\,000 \cdot 0,95 \cdot 0,7 = 6650 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Таким образом, объем вскрышных работ при реализации СГДС значительно меньше по сравнению с экскаваторным, что является одним из важных его преимуществ.

Определенный интерес вызывает сравнение предельного расстояния разрушения сапропеля, полученное опытным путем и расчетным, которое определяется по формуле

$$L_{\text{кр}} = \left(\frac{P_2}{P_{\text{кр}}} \right)^K \cdot L_{\text{н}}, \quad (8)$$

где $L_{\text{пр}}$ – предельное расстояние разрушения, м; $P_{\text{кр}}$ – минимальное динамическое давление, необходимое для разрушения сапропеля, бар; $K = 0,85$ – показатель интенсивности распада струи [8]; $L_{\text{н}}$ – длина начального участка струи, м.

$$P_{\text{кр}} = (C_{\text{кр}} - C_{\text{дл}}) + (\rho H \cdot 10^{-2} \text{tg} \varphi_{\text{кр}}) - (K_6 \rho H \cdot 10^{-2} \text{tg} \varphi_{\text{дл}}), \quad (9)$$

где $P_{\text{кр}}$ – минимальное динамическое давление, необходимое для разрушения сапропеля, МПа; $C_{\text{кр}}$ и $C_{\text{дл}}$ – кратковременный и длительный показатели сцепления соответственно, МПа [8, 9]; ρ – плотность сапропеля, т/м³; H – глубина разработки, м; $\varphi_{\text{кр}}$ и $\varphi_{\text{дл}}$ – кратковременный и длительный углы внутреннего трения соответственно [8, 9]; $K_6 = 1$ – коэффициент бокового давления [8].

$$P_{\text{кр}} = (0,17 - 0,04) + (1,041 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,466) - (1 \cdot 1,041 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,213) \approx 0,13 \text{ (МПа)}.$$

Длина начального участка струи

$$L_{\text{н}} = (A - B \text{Re}) d_0, \quad (10)$$

где A и B – эмпирические коэффициенты ($A = 62,4$, $B = 16 \cdot 10^{-6}$) [8]; Re – число Рейнольдса [1]; d_0 – диаметр отверстия в устройстве для размыва сапропеля, м.

$$L_{\text{н}} = (62,4 - 16 \cdot 10^{-6} \cdot 4761) \cdot 0,008 = 0,5 \text{ (м)}.$$

Предельное расстояние разрушения

$$L_{\text{кр}} = \left(\frac{6}{1,3} \right)^{0,85} \cdot 0,5 = 1,87 \text{ (м)}.$$

Предельное расстояние разрушения, полученное опытным (1,50 м) и расчетным (1,87 м) путем, имеет близкие значения.

Заключение. В результате проведения экспериментальных работ по СГДС с помощью сконструированной установки показаны возможность и целесообразность применения гидромеханизированного способа для добычи сапропеля из-под торфа. Установлены основные показатели добычи сапропеля карбонатного и органического типов скважинным способом. Определены расход и скорость течения воды и сапропелевой пульпы соответственно в нагнетательном и транспортирующем шлангах экспериментальной установки.

Показано, что избыточное давление в сапропеле, создаваемое высоконапорной мотопомпой Denzel PX-50H, составляет 6 бар, что обеспечивает размыв сапропелевой залежи на расстоянии 1,50 м от скважины. Выявлено, что среднее содержание сухого вещества в пульпе карбонатного сапропеля составляет 3 %, в пульпе органического сапропеля – 2 %. Расчетным путем установлено, что критическое динамическое давление, необходимое для разрушения сапропеля, составляет 0,13 МПа. Учитывая давление, создаваемое мотопомпой Denzel PX-50H, предельное расстояние разрушения равно 1,87 м.

Определены объемы вскрышных работ на условной площадке 1 га при добыче сапропеля из-под слоя торфа. У разрабатываемого СГДС они будут минимальными – 96 м³/га, по сравнению с применяемым в настоящее время экскаваторным способом (6650 м³/га).

Список использованных источников

1. Формулирование теоретических основ расчета гидродобычи залегающего под торфом сапропеля и разработка технологической классификации его залежей : отчет о НИР (промежуточ.) / НАН Беларуси, Ин-т природопользования ; рук. Б. В. Курзо. – Минск, 2023. – 84 с. – № ГР 20210174.
2. Разработка и апробация в опытных условиях элементов скважинной системы гидродобычи и гидротранспорта сапропеля и торфосапропеля, залегающих под торфом : отчет о НИР (промежуточ.) / НАН Беларуси, Ин-т природопользования ; рук. Б. В. Курзо. – Минск, 2024. – 101 с. – № ГР 20210174.
3. Основные принципы подбора насосов. Расчет насосов. – URL: https://ence-pumps.ru/podbor_raschet_nasosov/ (дата обращения: 08.09.2022).
4. Эквивалентный диаметр при расчете трубопровода. – URL: <https://ence-pumps.ru/truboprovody/> (дата обращения: 01.03.2023).
5. Веллер, М. А. Гидроторф. Технологический процесс торфодобычи и его организация / М. А. Веллер. – М. ; Л., 1935. – 331 с.
6. Никифоров, В. А. Руководство по добыче торфа / В. А. Никифоров. – Минск : Гос. изд-во БССР, 1960. – 308 с.
7. Богатов, Б. А. Технология и комплексная механизация торфяного производства / Б. А. Богатов, В. А. Никифоров. – Минск : Университетское, 1988. – 463 с.
8. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых / В. Ж. Арэнс, Н. И. Баби́чев, А. Д. Башкатов [и др.]. – М. : Горная книга, 2007. – 291 с.
9. Штин, С. М. Гидромеханизированная добыча торфа и производство торфяной продукции энергетического назначения / С. М. Штин ; под ред. И. М. Ялтанца. – М. : Горная книга, 2012. – 360 с.

References

1. *Formulirovanie teoreticheskikh osnov rascheta gidrodobychi zalegayushchego pod torfom sapropelya i razrabotka tekhnologicheskoy klassifikatsii ego zalezhej* [Formulation of theoretical foundations for calculating hydraulic mining of sapropel underlying peat and development of a technological classification of its deposits]. *Otchet o NIR* (promezhut.) [Research report (intermediate)]. Institute of Nature Management of the NAS of Belarus, supervisor B. V. Kurzo. Minsk, 2023, 84 p., St. Reg. no. 20210174. (in Russian)
2. *Razrabotka i aprobatsiya v opytnykh usloviyakh elementov skvazhinnoy 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* (promezhut.) [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)
3. *Osnovnye principy podbora nasosov. Raschet nasosov* [Basic principles for the selection of pumps. Calculation of pumps]. Available at: https://ence-pumps.ru/podbor_raschet_nasosov/ (accessed 8 September 2022). (in Russian)
4. *Ekvivalentnyy diametr pri raschete truboprovoda* (Equivalent diameter when calculating the pipeline). Available at: <https://ence-pumps.ru/truboprovody/> (accessed 1 March 2023). (in Russian)
5. Weller M. A. *Gidrotorf. Tekhnologicheskij process torfodobychi i ego organizatsiya* [Hydropeat. Technological process of peat extraction and its organization]. Moscow-Leningrad, 1935, 331 p. (in Russian)
6. Nikiforov V. A. *Rukovodstvo po dobyche torfa* [Peat Mining Guide]. Minsk, State Publ. House of the BSSR, 1960, 308 p. (in Russian)
7. Bogatov B. A., Nikiforov V. A. *Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya torfyanogo proizvodstva* [Technology and complex mechanization of peat production]. Minsk, University Publ., 1988, 463 p. (in Russian)
8. Arens V. Zh., Babichev N. I., Bashkatov A. D., Gridin O. M., Hrlev A. S., Hcheyan G. H. *Skvazhinnaya gidrodobycha poleznykh iskopaemykh* [Borehole hydraulic mining]. Moscow, Mountain book Publ., 2007, 291 p. (in Russian)
9. Shtin S. M. *Gidromekhanizirovannaya dobycha torfa i proizvodstvo torfyanoy produktsii energeticheskogo naznacheniya* [Hydromechanized extraction of peat and production of peat products for energy purposes]. Moscow, Mountain book Publ., 2012, 360 p. (in Russian)

Информация об авторах

Курзо Борис Валентинович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией использования и охраны торфяных и сапропелевых месторождений, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

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

Information about authors

Boris V. Kurzo – D. Cs. (Technical), Associate Professor, Head of Lab of Peat and Sapropel Deposits Utilization and Protection, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

Victor B. Kuntsevich – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). 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: kurs2014@tut.by

Татков Антон Юрьевич – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kurs2014@tut.by

Молочко Алексей Александрович – директор филиала «ТБЗ Сергеевичское» УП «МИНГАЗ», (ул. Юбилейная, 47, 222839, Пуховичский р-н, Правдинский пос., Беларусь)

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

Калилец Людмила Петровна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). 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 Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

Anton Yu. Tatkov – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kurs2014@tut.by

Aliaksei A. Molochko – Director of the Branch "TBZ Sergeevichskoe" of UE "MIN-GAS" (476, Yubiley naya Str., 222839, Pukhovichi District, Pravdinsky Settlement, Belarus)

Tatiana I. Makarenko – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: makarenko.IP@mail.ru

Inna V. Ageichik – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: ageichik.iv@mail.ru

Lyudmila P. Kalilets – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАССОПЕРЕНОСА И ПУЧЕНИЯ ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ ГРУНТОВ

К. А. Агутин, Г. П. Бровка, И. В. Дедюля

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В данной работе описаны методы экспериментальных исследований характеристик морозного пучения грунтов в соответствии с разработанными математическими моделями авторов. На предварительной стадии исследования на образцах сравнительно малого размера в закрытой системе влагообмена предлагается оперативно определять влияние температурного режима, влажности, плотности и наличия в поровом растворе солей на основную характеристику переноса влаги при промерзании грунтов – коэффициент термовлагопроводности мерзлой зоны K_m . Использование этого коэффициента, численно равного потоку влаги из талой зоны в мерзлую при единичном градиенте температуры, позволяет с учетом динамики температурного поля в промерзающем грунте рассчитать перераспределение влаги и величину морозного пучения.

Следующая стадия исследований проводится на установке с открытой системой влагообмена на цилиндрических образцах, диаметр и высота которых составляют 100 мм. Указанное соотношение размеров при хорошей боковой теплоизоляции обеспечивает их одномерное промерзание. Созданная установка позволяет реализовать различные варианты исследований характеристик массопереноса и морозного пучения, а также максимального давления пучения в зависимости от температуры на охлаждаемой поверхности и условий подпитки образца влагой или раствором соли.

Ключевые слова: морозное пучение; миграция влаги; грунты; характеристики влагопереноса; методы исследования.

Для цитирования. Агутин К. А. Бровка Г. П., Дедюля И. В. Установки и методики исследования характеристик массопереноса и пучения при промерзании грунтов // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 148–158.

INSTALLATIONS AND METHODS FOR STUDYING OF MASS TRANSFER AND SWELLING CHARACTERISTICS DURING SOILS FREEZING

K. A. Agutin, G. P. Brovka, I. V. Dedyulya

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

Abstract. The article describes the methods of the experimental studies of the characteristics of soil freezing in accordance with the developed mathematical models of the authors. At the preliminary stage of research on the samples of relatively small size in a closed moisture-exchange system it is proposed to determine the influence of temperature regime, humidity, density and the presence of salts in pore solution on the main characteristic of moisture transfer during soil freezing – the coefficient of the thermal moisture conductivity of the frozen zone K_m . The use of this coefficient, which is numerically equal to the moisture flux from the thawed zone to the frozen zone at a single temperature gradient, makes it possible to calculate moisture redistribution and frost heave in regard to the dynamics of the temperature field in the freezing ground.

The next stage of research is carried out at an installation with the open system of moisture exchange on cylindrical samples with the diameter and height of 100 mm. The specified ratio of dimensions with good lateral thermal insulation ensures their one-dimensional freezing. The created installation allows to realize different variants of the research of mass transfer and frost heaving characteristics, as well as maximum frost heaving pressure depending on the temperature on the cooled surface and conditions of the sample feeding with moisture or salt solution.

Keywords: frost heaving; moisture migration; soils; moisture transfer characteristics; research methods.

For citation. Agutin K. A., Brovka G. P., Dedyulya I. V. Installations and methods for studying of mass transfer and swelling characteristics during soil freezing. *Nature Management*, 2025, no. 1, p. 148–158.

Введение. В ранее опубликованных работах авторов указывалось, что в настоящее время при проведении инженерных изысканий объектов, подвергающихся морозному пучению, согласно нормативным техническим документам, используется подход, основанный на сравнительной оценке параметров морозного пучения. Такой подход не позволяет учитывать различные начальные и граничные условия при расчетах морозного пучения. Поэтому часто фактическая величина морозного пучения

грунтов и горных пород может быть как больше, так и меньше величины, оцениваемой по стандартным методам испытания.

Сравнительный подход или метод аналогии при инженерных испытаниях позволяет дать в основном качественную характеристику склонности исследуемых образцов к морозному пучению. В связи с этим необходимо развивать методологию таких научных исследований, которая, с одной стороны, должна выявлять основные механизмы массопереноса и деформации при промерзании, а с другой – уточнять согласованные математические модели и экспериментальные методы в соответствии с феноменологическим подходом, характерным для теории тепло- и массопереноса. Следует отметить, что в этом направлении, несмотря на значительный объем публикаций [1–10], остаются еще дискуссионные вопросы, что не позволяет в полном объеме стандартизировать методы оценки морозного пучения.

В рамках указанных проблем в данной работе предлагаются методы экспериментальных исследований характеристик морозного пучения грунтов в соответствии с разработанными подходами и математическими моделями авторов [11–14].

Установка и методика исследования характеристик массопереноса при промерзании в условиях закрытой системы влагообмена. Для оперативного определения характеристик морозного пучения на предварительном этапе исследований предлагается использовать модернизированную установку, которая использовалась ранее при изучении миграции влаги при промерзании грунтов [13] (рис. 1). Установка позволяет создавать неоднородное температурное поле в тонком 10-миллиметровом слое исследуемого грунта. Она состоит из массивной плиты 1 толщиной 10 мм, плотно зажатой по торцевым поверхностям между двумя теплообменниками, расположенными на расстоянии 200 мм друг от друга. Через левый теплообменник прокачивается антифриз от криостата 14 с температурой $t_1 < 0^\circ\text{C}$, с правой стороны расположен нагревательный элемент 2 для создания необходимого в опыте температурного поля. Таким образом в плите создается температурное поле, необходимое в проводимом опыте. Осуществленная модернизация позволила не только устанавливать в пластине контролируемое распределение температуры, но и задавать необходимую динамику температурного поля с продвижением границы талой и мерзлой зон.

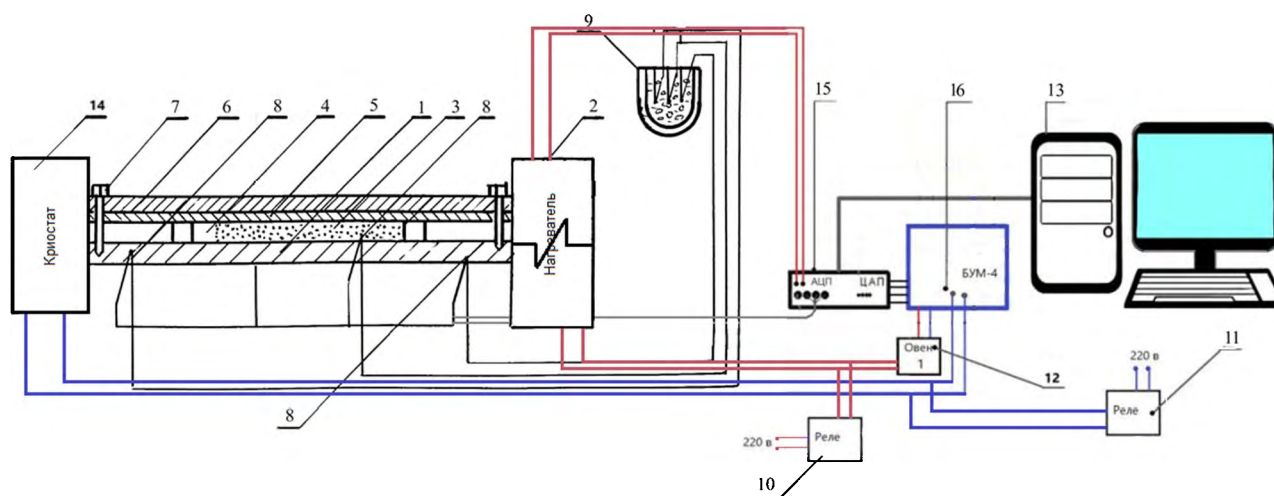


Рис. 1. Схема установки для исследования миграции влаги в стационарном температурном поле:
 1 – массивная стальная плита; 2 – нагреватель; 3 – образцы исследуемого материала;
 4 – полость для raspивания в кассете; 5 – металлическая пластина; 6 – текстолитовая пластина;
 7 – прижимные винты, 8 – термопары; 9 – ноль-термостат; 10 – реле включения нагревателя;
 11 – реле включения компрессора холодильной камеры; 12 – измеритель-регулятор температуры Овен-1;
 13 – персональный компьютер; 14 – криостат; 15 – четырехканальный компьютерный порт с АЦП и ЦАП;
 16 – четырехканальный усилитель мощности БУМ-4

Fig. 1. Scheme of the installation for the study of moisture migration in a stationary temperature field:
 1 – massive steel plate; 2 – heater; 3 – samples of the material under study; 4 – cavity for raspивания in the cassette;
 5 – metal plate, 6 – textolite plate; 7 – clamping screws; 8 – thermocouples; 9 – zero-thermostat;
 10 – heater switch-on relay; 11 – refrigerating chamber compressor switch-on relay;
 12 – temperature regulator Oвен-1; 13 – personal computer; 14 – cryostat;
 15 – four-channel computer port with analog-to-digital converter (АЦП) and digital to analog converter(ЦАП);
 16 – four-channel power amplifier (power amplification block) БУМ-4

Исследуемый грунт помещали в специальную кассету, которая представляет собой рамку из оргстекла с приклеенным полимерным днищем. На рис. 2 указаны размеры кассеты, выраженные в миллиметрах. Заполненную кассету сверху закрывали полимерной прозрачной пленкой и укладывали на плиту. Размеры установки позволяют одновременно укладывать пять заполненных кассет. Каждую из заполненных кассет уже непосредственно на плите покрывали тонкой прозрачной пластиной (по размеру кассеты), затем – металлической 5 10-миллиметровой толщины и эбонитовой 6 пластинами. С помощью четырех болтов 7 кассеты прижимали к плите, чем обеспечивали тепловой контакт и задаваемое в опыте температурное поле. Использование прозрачных материалов позволяет визуально наблюдать картину изменения структуры замороженных образцов перед выемкой их из установки.

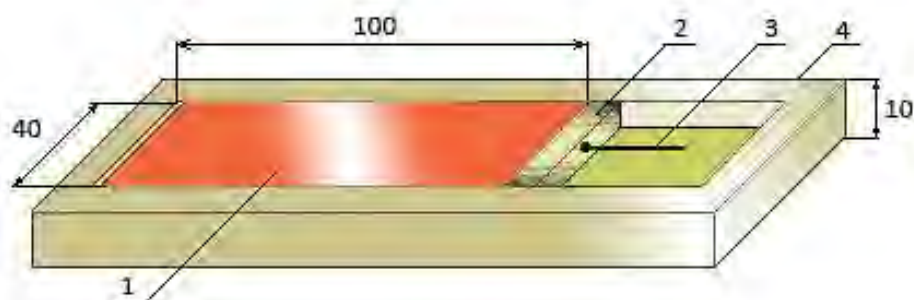


Рис. 2. Кассета для исследования криогенного массопереноса и пучения грунтов и горных пород:
1 – исследуемый материал; 2 – перегородка из пенопласта;
3 – инициатор кристаллизации; 4 – корпус кассеты из оргстекла

Fig. 2. Cassette for the study of cryogenic mass transfer and swelling of soils and rocks:
1 – material under study; 2 – partition made of foam plastic;
3 – crystallization initiator; 4 – plexiglass cassette body

Контроль за температурным режимом установки осуществляли с помощью медь-константановых термопар, измерительные спаи которых размещены на крайних точках стальной плиты. Для модернизации установки использовали компьютерную систему, включающую четырехканальный преусилитель 16, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), выполненные в виде модуля В-381 15, соединенного с ПК 13 через принтерный порт, а также двух промежуточных реле 10 и 11, непосредственно регулирующих режим работы нагревательного элемента и криостата. Задание и контроль режимов проведения опытов проводили с помощью специально разработанной компьютерной программы. Окно основного интерфейса этой программы представлено на рис. 3.

Модернизированная установка позволяет в строго контролируемых температурных режимах проводить опыты по исследованию миграции влаги и солей в мерзлых грунтах и горных породах под воздействием градиента температуры в статическом и динамическом температурных режимах. В статическом температурном режиме поддерживается стационарное температурное поле, включающее зоны с отрицательной и положительной температурой с заданным градиентом температуры по длине образца. В динамическом температурном режиме при заданном градиенте температуры зон их граница продвигается с постоянной скоростью.

Опыты проводили по следующей методике. Кассеты равномерно заполняли исследуемым материалом. В правой части кассеты оставляли свободное пространство 4, куда образец может распучиваться. Заполненные кассеты влагоизолировали и выдерживали в изотермических условиях не менее 2 сут. Перед началом опыта в каждую кассету вставляли инициатор кристаллизации 3 (рис. 2) в виде тонкой полимерной трубки, заполненной увлажненным пористым материалом. Размещение кассет на плите установки осуществляли после достижения заданного температурного режима.

В статическом режиме на термостатируемой плите температуру изменяли от $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ с границей мерзлой и талой зон, сдвинутой от центра на 2–4 см в сторону холодной температуры с таким расчетом, чтобы величина мерзлой зоны составляла 40–60 мм. В динамическом температурном режиме начальное распределение температуры изменяли от $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем в процессе опыта температуру на холодной стороне в течение суток равномерно понижали по заданной программе до $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. На теплой стороне температуру также автоматически синхронно понижали до $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$, обеспечивая постоянный градиент температуры порядка $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$. Длительность процесса промораживания образцов в статическом и динамическом режимах составила около 24 ч.

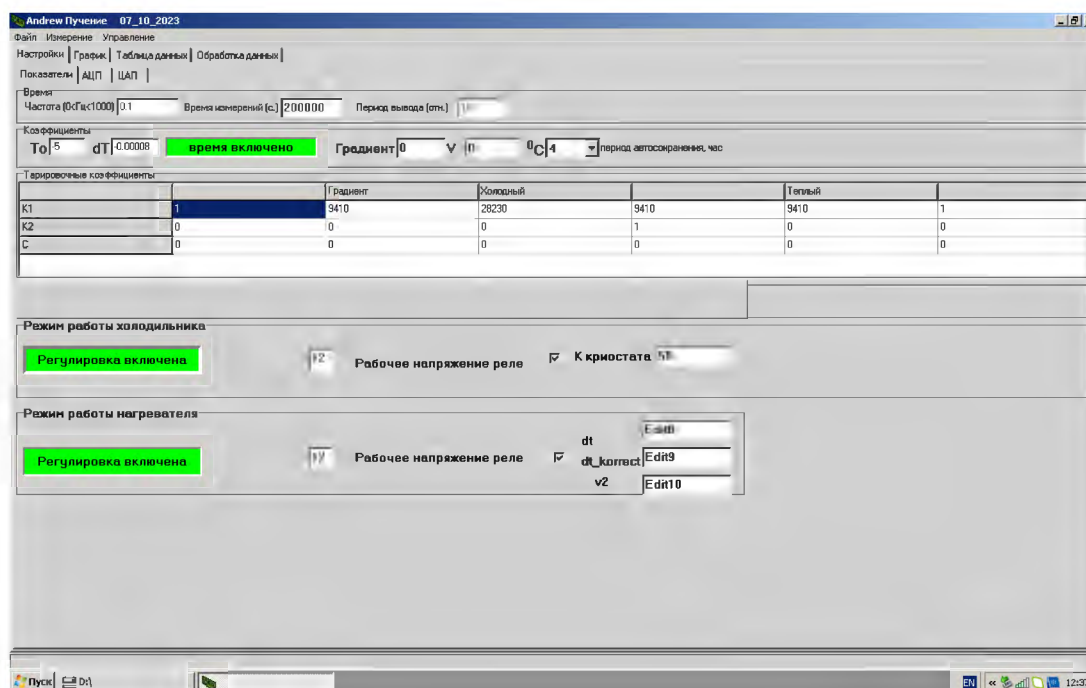


Рис. 3. Окно основного интерфейса программы для автоматизации и контроля температурного режима установки для исследования криогенной миграции влаги и солей

Fig. 3. Window of the main interface of the program for automation and controlling temperature regime of the installation for the study of cryogenic migration of moisture and salts

После выдерживания кассет с образцами в течение указанного интервала времени в заданном температурном режиме образцы извлекали и разрезали на 10-миллиметровые зоны с последующим определением влагосодержания в каждой из них. На рис. 4 и 5 представлены графики типичного перераспределения влаги в образцах глинистых пород в статическом и динамическом режимах.

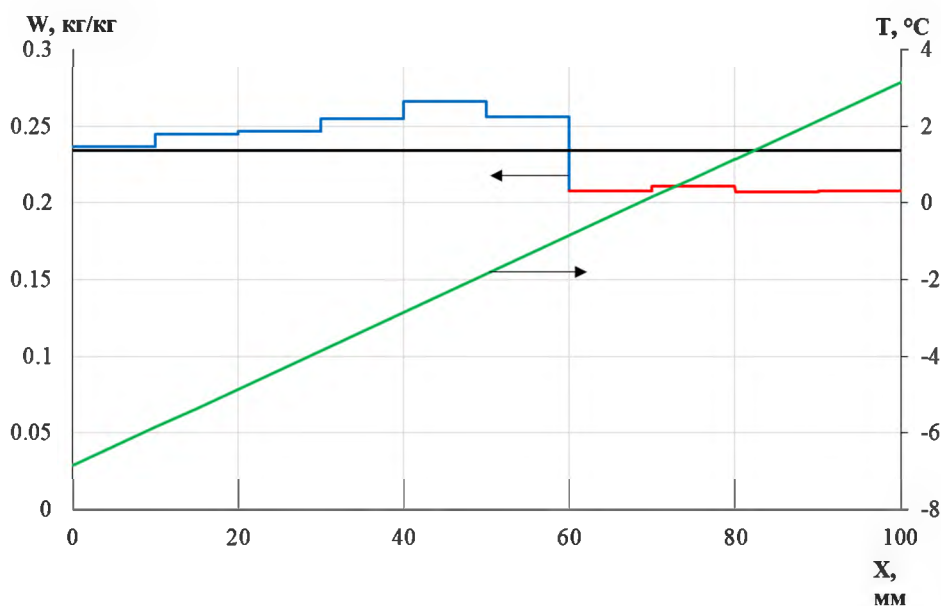


Рис. 4. Типичное перераспределение влаги в образце глины ($W_0 = 0,233$, $T_{нз} = -0,85^{\circ}\text{C}$, влагосодержание – 0,233 кг/кг, режим – статический)

Fig. 4. Typical moisture redistribution in a clay sample ($W_0 = 0.233$, $T_{нз} = -0.85^{\circ}\text{C}$, moisture content – 0.233 kg/kg, static mode)

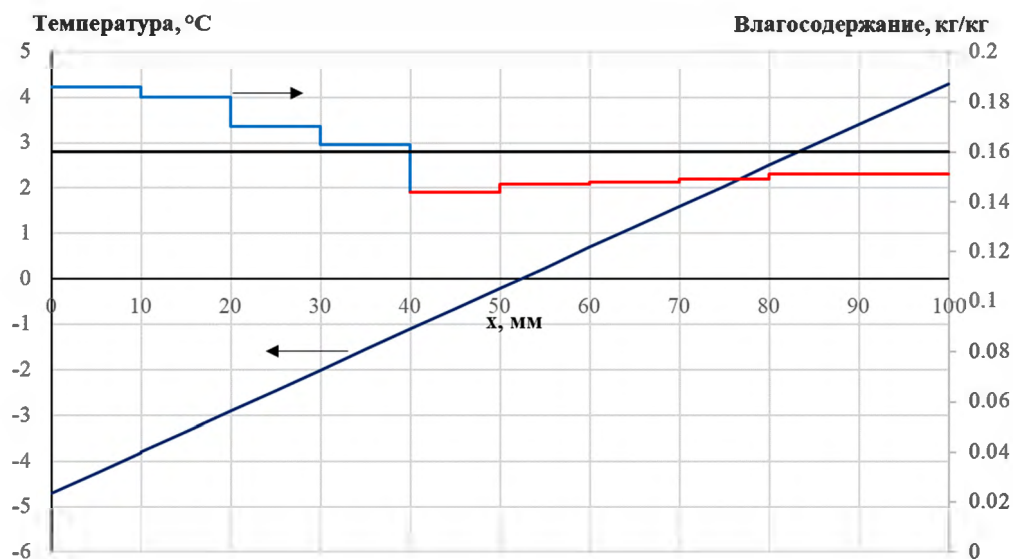


Рис. 5. Типичное перераспределение влаги в образце (смесь глина – песок, $T_{нз} = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$, влагосодержание – 0,160 кг/кг, режим – динамический)

Fig. 5. Typical moisture redistribution in the sample (clay – sand mixture, $T_{нз} = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$, moisture content – 0.160 kg/kg, dynamic mode)

При наличии в поровом растворе образцов соли кроме распределения влаги определяли и распределение соли.

Методика определения распределения соли в образцах грунтов после промораживания.

По окончании процесса промораживания образцов кассеты по очереди извлекали из установки. Сразу определяли глубину промерзания материала в кассете. Для определения распределения влаги и соли по длине образца его разделяли на 10-миллиметровые зоны, каждую из которых помещали в отдельный бюкс. После сушки и определения влагосодержания образец каждой зоны непосредственно в бюксе заливали дистиллированной водой в соотношении по массе 1 : 1 и герметично укупоривали. В таком состоянии образцы хранили 2 сут. По истечении этого срока бюксы открывали, затем их содержимое тщательно перемешивали до состояния суспензии.

Концентрацию соли в поровой влаге определяли методом контактной кондуктометрии. Для этого использовали кондуктометрическую ячейку, представляющую собой выфрезерованную в плексигласе ванночку (10 мм × 10 мм × 35 мм), в торцах которой размещены плоские (10 мм × 10 мм) титановые электроды (рис. 6).



Рис. 6. Кондуктометрическая ячейка

Fig. 6. Conductometric cell

Ванночку до краев заполняли суспензией исследуемого грунта. С помощью моста переменного тока Р577 определяли электрическое сопротивление помещенного в ванночку материала. Проводимость суспензии прямо пропорциональна концентрации соли, поэтому сначала по формуле $\sigma = 1 / R$ (σ – электрическая проводимость, R – измеренное сопротивление материала) рассчитывали проводимость суспензии, далее строили график распределения проводимости по длине исследуемого материала, а затем – график зависимости распределения соли.

Для получения зависимости распределения соли по длине образца использовали тарировочные графики, которые строили следующим образом. Дополнительно для каждого исследуемого вида образцов изготавливали по несколько проб с различным содержанием соли NaCl. В дальнейшем эти пробы промораживали, высушивали и увлажняли по аналогичной с исследуемыми образцами методике. После этого определяли их электропроводность и строили график зависимости $R = R(c)$, где c – концентрация соли.

Методика расчета характеристик влагопереноса при промерзании в условиях закрытой системы. На основании полученных экспериментальных данных по распределению влаги в образцах горных пород при их промораживании в условиях закрытой системы влагообмена проводили расчет характеристик влагопереноса.

Расчет плотности потока для статического промораживания:

$$q_{\text{ст}} = \frac{\rho_{\text{ск}} \Delta W_{\text{мсп}} h_{\text{м}}}{\Delta \tau}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{ск}}$ – плотность скелета, кг/м³; $\Delta W_{\text{мсп}}$ – среднее увеличение влагосодержания мерзлой зоны по сравнению с исходным влагосодержанием, кг/кг; $h_{\text{м}}$ – величина мерзлой зоны, м; $\Delta \tau$ – время промораживания, с (~86 000 с).

Расчет плотности потока для динамического промораживания при низкой влагонепроницаемости мерзлой зоны и локализации льдовыделения вблизи фронта промерзания:

$$q_{\text{д}} = \Delta W_{\text{м/т}} \rho_{\text{ск}} V, \quad (2)$$

где $\Delta W_{\text{м/т}}$ – разность влагосодержания на границе мерзлой и талой зон, кг/кг; V – скорость продвижения границы промерзания, м/с (~6·10⁻⁷ м/с).

Для засоленных пород с существенной влагонепроницаемостью мерзлой зоны, а также незасоленных пород с выявленной заметной влагонепроницаемостью можно использовать модифицированную формулу (3), где вместо $\Delta W_{\text{мт}}$ – разность влагосодержания на границе мерзлой и талой зон используется $\Delta W_{\text{мсп}}$ – среднее увеличение влагосодержания мерзлой зоны по сравнению с исходным влагосодержанием.

$$q_{\text{д}} = \Delta W_{\text{мсп}} \rho_{\text{ск}} V. \quad (3)$$

Расчет коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны:

$$K_{\text{м}} = - \frac{q_{\text{ст(д)}}}{\text{grad } T}, \quad (4)$$

где $q_{\text{ст(д)}}$ – плотность потока для статического либо динамического промораживания; $\text{grad } T$ – градиент температуры, °С/м.

Расчет коэффициента пучения за счет миграции влаги из талой зоны в мерзлую:

$$K_{\text{пм}} = \frac{\Delta W_{\text{мсп}} \rho_{\text{ск}}}{\rho_{\text{л}}}, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{л}}$ – плотность льда, кг/м³ (916 кг/м³).

Для образцов грунтов с коэффициентом водонасыщения близким к 1 дополнительно учитывали пучение за счет изменения объема влаги, перешедшей в лед. В таком случае коэффициент пучения

$$K_{\text{п}} = \frac{\Delta W_{\text{мсп}} \rho_{\text{ск}}}{\rho_{\text{л}}} + 1,09 (W_0 - W_{\text{н}}) \rho_{\text{ск}}, \quad (6)$$

где W_0 – исходная влажность; $W_{\text{н}}$ – количество незамерзшей воды при температуре –10 °С.

Установка для исследования процессов морозного пучения грунтов в условиях открытой системы влагообмена. Для исследования процессов пучения дисперсных грунтов в открытой системе использовали оригинальную лабораторную установку, разработанную по базовой программе научных исследований лаборатории физико-химической механики Института природопользования НАН Беларуси. Данная установка позволяет отслеживать динамику морозного пучения в режиме реального времени в зависимости от заданных условий эксперимента и физико-химических свойств опытного образца грунта. Вся установка состоит (рис. 7) из цилиндрического корпуса 1, смонтированного на прочном теплоизолирующем основании 2, выполненном из эбонита.

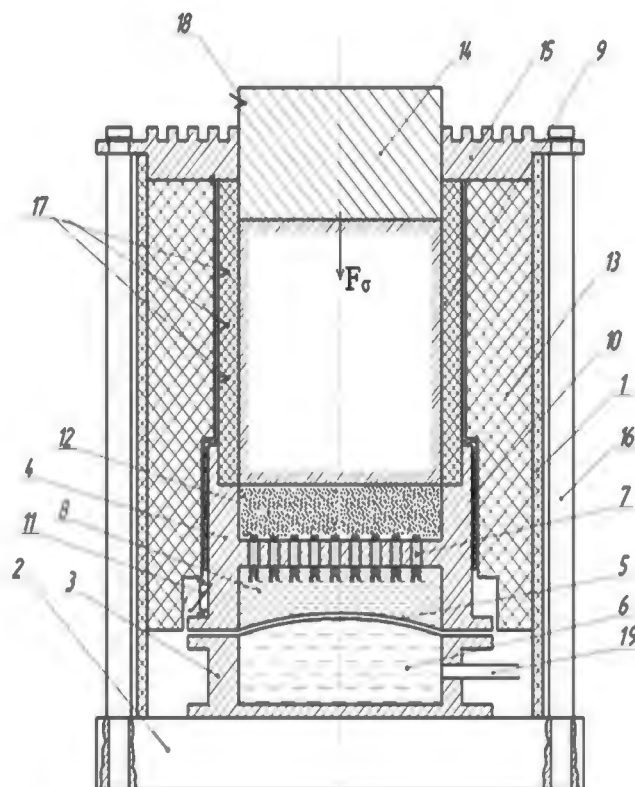


Рис. 7. Установка для исследования процессов пучения дисперсных грунтов

- 1 – цилиндрический корпус из полиэтиленовой трубы; 2 – основание;
3 – нижняя часть корпуса дренажной системы; 4 – верхняя часть корпуса дренажной системы;
5 – резиновая мембрана; 6 – силиконовое масло; 7 – волокнистый материал; 8 – вода (раствор);
9 – кассета с исследуемым грунтом; 10 – нагревательный элемент; 11 – датчик температуры;
12 – дисперсный материал; 13 – теплоизоляционный кожух; 14 – штамп; 15 – теплообменник;
16 – металлические стойки; 17 – термопары для контроля распределения температуры в образце;
18 – термопара контроля температуры в штампе; 19 – трубка для соединения с мерной бюреткой

Fig. 7. Installation for research of dispersed soil swelling processes:

- 1 – cylindrical body made of polyethylene pipe; 2 – base; 3 – lower part of the drainage system body;
4 – upper part of the drainage system body; 5 – rubber membrane; 6 – silicone oil; 7 – fiber material;
8 – water (solution); 9 – cassette with the studied soil; 10 – heating element; 11 – temperature sensor;
12 – disperse material; 13 – heat-insulating casing; 14 – die; 15 – heat exchanger; 16 – metal posts;
17 – thermocouples for control of temperature distribution in the sample;
18 – thermocouple for temperature control in the die; 19 – tube for connection with measuring burette

Установка оснащена дренажной системой, рабочая камера которой изготовлена из нержавеющей стали и состоит из двух камер: нижней 3 и верхней 4, разделенных между собой эластичной мембраной 5. Нижняя камера заполнена силиконовым маслом 6. Верхняя камера состоит из двух отсеков, разделенных между собой перегородкой. В перегородке просверлено свыше 100 отверстий диаметром 3,5 мм. В эти отверстия очень плотно затянут волокнистый материал 7, через который из нижнего отсека, заполненного либо дистиллированной водой 8, либо раствором, влага поступает в верхний отсек. Над верхним отсеком устанавливают капролоновую кассету с исследуемым грунтом 9. На внешней поверхности верхнего отсека размещают нагревательный элемент 10 и датчик температуры 11

системы термостатирования подпитывающей жидкости, которые с помощью измерителя-регулятора обеспечивают поддержание заданной положительной температуры нижней части образца и подпитывающей жидкости. Пространство между кассетой и волокнистым материалом перед установкой кассеты заполняют дисперсным материалом 12, который хорошо фильтрует воду и может доставлять ее к исследуемому грунту. Указанный материал подбирают индивидуально для каждого исследуемого грунта. В некоторых случаях это может быть тот же исследуемый грунт. В нижнюю половину по специальной гибкой трубке силиконовое масло подают из бюретки, позволяющей контролировать расход масла и соответственно количество воды, использованной на подпитку образца. Варьируя разность высот между уровнем масла в бюретке и уровнем воды в верхней половине дренажной системы можно задавать требуемый в данном опыте режим подпитки влагой промораживаемого грунта.

В пространстве между корпусом установки и кассетой с дренажной системой расположен теплоизоляционный кожух 13 из пенополимера, коэффициент теплопроводности которого составляет $0,03 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. После установки кассеты, убедившись, что между исследуемым грунтом и материалом из системы подпитки существует контакт, в кассету вставляют металлический штамп 14, который позволяет изменять внешнюю нагрузку на исследуемый образец. Завершают сборку установкой алюминиевого теплообменника 15. С целью обеспечения хорошего теплового контакта соприкасающихся поверхностей штампа и теплообменника между ними закладывают теплопроводящую смазку.

С помощью теплообменника и четырех металлических стоек 16 корпус установки прочно соединяют с основанием.

Распределение температуры по высоте образца в процессе промораживания контролируют три термодатчика 17, рабочие спай которых заглублены в кассету на разной высоте. Отдельная термодатчик контролирует температуру штампа 18. Регистрацию температуры осуществляют с помощью компьютерной системы, описанной выше.

Кассета имеет высоту 115 мм. Она изготовлена таким образом, что диаметр ее верхней части несколько больше диаметра основания. Грунтом кассету заполняют таким образом, что в верхней ее части остается незаполненная зона высотой около 15 мм. Это позволяет грунту распухиваться в процессе промерзания в свободную зону, поднимая штамп вверх. При необходимости высоту кассеты, полиэтиленового корпуса установки и теплоизоляционного кожуха можно увеличивать за счет соответствующих вставок на высоту 50 мм.

С помощью разработанной установки можно проводить различные варианты исследования характеристик массопереноса и пучения при промерзании грунтов. Первым вариантом является промораживание, соответствующее условиям полуограниченной среды, т. е. температурное изменение не должно достигать нижней границы положительной области и распределение температуры носит автомодельный характер, позволяющий распределение температуры выражать от обобщенного пространственно-временного параметра $\xi = x\tau^{-0.5}$. Для этого образец промораживают на глубину не более половины его начального размера. Типичные картины распределения влажности и формулы для расчета коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны K_m и коэффициента диффузии талой зоны a_w представлены ниже – на рис. 8 и в формулах (7), (8).

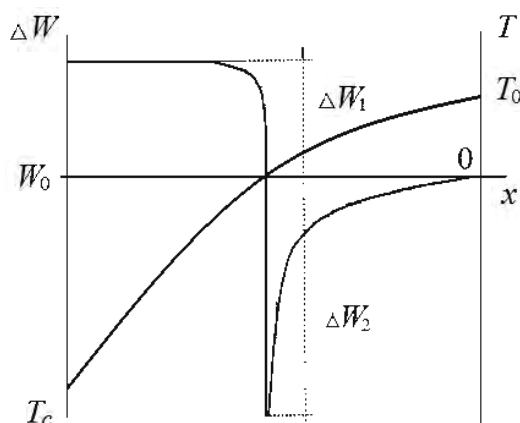


Рис. 8. Типичное распределение влагосодержания при промерзании грунта в форме полуограниченной среды с постоянной температурой на поверхности (автомодельная задача)

Fig. 8. Typical distribution of moisture content at freezing of the ground in the form of a semi-confined medium with constant surface temperature (auto-model task)

$$K_m = \frac{\frac{1}{2}(W|_{x=\xi-0} - W|_{x=\xi+0})\rho_{\text{ск}}\frac{\xi}{\tau}}{\left.\frac{\partial W}{\partial x}\right|_{x=\xi+0}}, \quad (7)$$

$$a_w = \frac{-\frac{1}{2}(W|_{x=\xi-0} - W|_{x=\xi+0})\rho_{\text{ск}}\frac{\xi}{\tau}}{\left.\frac{\partial W}{\partial x}\right|_{x=\xi+0}}, \quad (8)$$

где $W|_{x=\xi-0}$ – влагосодержание в мерзлой зоне на фронте промерзания; $W|_{x=\xi+0}$ – влагосодержание в талой зоне на фронте промерзания; ξ – величина промерзшей зоны; τ – время промерзания.

Во втором варианте на установке можно проводить опыты по определению интенсивности морозного пучения при различных условиях подпитки влагой талой зоны и величины нагрузки на грунт. Для этого после размещения установки на рабочем столе «АСИС» образец выдерживали в камере в течение суток при температуре на 2–3 °С выше температуры начала замерзания воды в образце. При этом уровень масла в мерной бюретке устанавливали в пределах на 0,2–0,5 м ниже корпуса дренажной системы. В отдельных опытах уровень масла в мерной бюретке может соответствовать корпусу дренажной системы или быть несколько выше его. Таким образом имитировали условия подпитки исследуемого образца влагой. Нагрузка верхней части образца в этой стадии должна составлять 0,1–0,2 кгс/см², что соответствует давлению слоя грунта в 1–2 м.

После этого камеру переводили в режим замораживания и вели наблюдение за температурой в точках расположения датчиков, расходу жидкости в системе подпитки и положению верхней части штампа. При этом значения температуры в камере и в системе подпитки подбирали таким образом, чтобы с учетом температуры начала замерзания воды в образце и коэффициентов теплопроводности мерзлой и талой частей образца фронт промерзания образца был стабилизирован на расстоянии 4–5 см от нижней кромки штампа. Температура в камере в основном составляла на 4–5 °С ниже температуры начала замерзания в образце, а градиент температуры в мерзлой части образца – порядка 1 °С/см. В установившемся режиме первая стадия опыта длилась в течение 1–2 сут.

В заключительной стадии опыта с помощью испытательного комплекса «АСИС» на штамп воздействовали последовательно возрастающей через 2–3 ч нагрузкой до прекращения деформации морозного пучения. Эту нагрузку фиксировали как максимальное давление морозного пучения при заданных условиях температурного режима и подпитки образца влагой. После фиксации максимальной нагрузки опыт прекращали, образец изымали из установки и разрезали на 5–10-миллиметровые зоны для последующего анализа на распределение влаги.

В третьем варианте опыты проводили по методике, максимально соответствующей ГОСТ 28622-2012. На предварительной стадии отработки методики исследования проводили сравнения расчетными методами динамики температурного поля при высоте образца 100 и 150 мм. В результате установлено, что при высоте образца 150 мм проявляются факторы влияния бокового теплообмена на скорость промерзания образцов вплоть до остановки продвижения фронта промерзания на глубине 50–70 мм. Особенно явно это проявляется для образцов глины при влажности менее 0,21 кг/кг, когда различие коэффициентов теплопроводности мерзлых и талых образцов составляет не более 20 %. Фактическое промерзание глинистых пород при аналогичных исходных параметрах подтвердили расчетные данные. Для устранения влияния бокового теплообмена при высоте образцов 150 мм необходимо создавать дополнительные охранные тепловые экраны и более эффективные теплоизоляционные кожухи. Также методами численного моделирования установлено, что при высоте образца в 100 мм и промораживании его до 2/3 (67 мм) в 2 раза уменьшается время промораживания при сохранении относительной величины пучения и увеличения влажности мерзлой зоны. Это соответствует теории подобия процессов тепло- и массопереноса. Таким образом, для выполнения научных исследований в области оценки пучинистых свойств грунтов можно рекомендовать проводить опыты при высоте образцов в 100 мм, соблюдая относительную величину промерзания, рекомендуемую ГОСТ 28622-2012. В области изысканий под строительство конкретных объектов необходимо эти вопросы согласовывать с заказчиком.

С учетом приведенных аргументов и анализа предлагается следующая методика, учитывающая основные принципы ГОСТ 28622-2012. После размещения установки на рабочем столе «АСИС» к образцу прикладывают нагрузку, соответствующую величине эффективного давления на горизонте от-

бора кернового материала, равную разности бытового давления и гидростатического давления вышележащего слоя воды на данном горизонте. В таком состоянии образец выдерживают в климатической камере в течение суток при температуре на 1°C выше температуры начала замерзания воды в образце. При этом уровень масла в мерной бюретке устанавливают в пределах на $0,2\text{--}0,5$ м ниже корпуса дренажной системы. Затем камеру переводится в режим замораживания и ведут наблюдение за температурой в точках расположения датчиков, расходом жидкости в системе подпитки и положением верхней части штампа. Значения температуры в камере и в системе подпитки подбирают таким образом, чтобы обеспечить температуру на штампе и в нижней части образца $-4 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ на штампе и $+2 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ в нижней части образца. В установившемся режиме опыт продолжают в течение 1–2 сут до промораживания образца на глубину 66–68 мм. После окончания опыта образец извлекают из обоймы, измеряют фактическую толщину мерзлой зоны и разрезают на 10-миллиметровые слои для определения их влажности.

Заключение. Предложенная методика определения характеристик массопереноса и морозного пучения грунтов на предварительной стадии исследования позволяет на образцах сравнительно малого размера в закрытой системе влагообмена оперативно определить влияние температурного режима, влажности, плотности и наличия в поровом растворе солей на основную характеристику переноса влаги при промерзании грунтов – коэффициент термовлагопроводности мерзлой зоны K_m . Используя эту характеристику, которая численно равна потоку влаги из талой зоны в мерзлую при единичном градиенте температуры, и динамику температурного поля в промерзающем грунте, можно рассчитать перераспределение влаги и величину морозного пучения.

Следующую стадию исследования рекомендуется проводить на установке с открытой системой влагообмена с достаточно представительными цилиндрическими образцами, диаметр и высота которых составляет 100–150 мм. Указанное соотношение размеров при хорошей боковой теплоизоляции обеспечивает одномерное промерзание образцов. На указанной установке можно реализовать три варианта исследований характеристик массопереноса и морозного пучения, а также максимального давления пучения в зависимости от температуры на охлаждаемой поверхности и условий подпитки образца влагой или раствором соли.

Разработанные методики определения характеристик массопереноса и морозного пучения грунтов в настоящее время используются в лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем Института природопользования НАН Беларуси для выполнения исследований по государственной программе научных исследований, по научному обеспечению подпрограммы «Развитие деятельности Белорусской антарктической станции» и договорным работам с проектными организациями Российской Федерации.

Список использованных источников

1. Втюрина, Е. А. Льдообразование в горных породах / Е. А. Втюрина, Б. И. Втюрин. – М. : Наука, 1970. – 279 с.
2. Гречищев, С. Е. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз / С. Е. Гречищев, Л. В. Чистотин, Ю. Л. Шур. – М. : Недра, 1980. – 382 с.
3. Дерягин, Б. В. Термокристаллизационный перенос влаги в промерзающих пористых телах / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев // Теплообмен. – 1980. – Т. 7. – С. 3–10.
4. Дерягин, Б. В. Течение незамерзающих прослоек воды и морозное разрушение пористых тел / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев // Коллоидный журнал. – 1980. – Т. 42, № 5. – С. 842–852.
5. Ершов, Э. Д. Экспериментальное исследование влагопереноса в грунтах при их промерзании в условиях «открытой» и «закрытой» системы / Э. Д. Ершов, В. Г. Чеверев, Ю. П. Лебеденко // Мерзлотные исследования. – М. : Изд-во Москов. ун-та, 1978. – Вып. 17. – С. 197–206.
6. Комаров, И. А. Термодинамика и теплообмен в дисперсных мерзлых породах / И. А. Комаров. – М. : Научный мир, 2003. – 608 с.
7. Кудрявцев, С. А. Численное моделирование процесса промерзания, морозного пучения и оттаивания грунтов / С. А. Кудрявцев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2004. – № 5. – С. 21–26.
8. Орлов, В. О. Морозное пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений / В. О. Орлов, Ю. Д. Дубнов, Н. Д. Меренков. – Л. : Стройиздат, Ленинград. отд., 1977. – 183 с.
9. Пермьяков, П. П. Идентификация параметров математической модели тепловлагопереноса в мерзлых грунтах / П. П. Пермьяков. – Новосибирск : Наука, 1989. – 84 с.
10. Чеверев, В. Г. Природа криогенных свойств грунтов / В. Г. Чеверев. – М. : Научный мир, 2004. – 234 с.
11. Бровка, Г. П. Математические модели и методы экспериментального исследования процессов теплообменного переноса и пучения при промерзании грунтов / Г. П. Бровка, К. А. Агутин, А. А. Мурашко // Инженерная геология. – 2021. – Т. XVI, № 4. – С. 62–71.
12. Бровка, Г. П. Тепло- и массоперенос в природных дисперсных системах при промерзании / Г. П. Бровка. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 189 с.
13. Бровка, Г. П. Взаимосвязанные процессы тепло- и массопереноса в природных дисперсных средах / Г. П. Бровка. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 362 с.

14. Бровка, Г. П. Методологические вопросы исследования и прогнозирования морозного пучения грунтов / Г. П. Бровка, И. В. Дедюля, К. А. Агутин // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения : материалы науч.-практ. конф., г. Москва, 13–14 апр. 2017 г. – М., 2017. – С. 178–185.

References

1. Vtyurina E. A., Vtyurin B. I. *L'doobrazovanie v gornyh porodah* [Ice formation in rocks]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 279 p. (in Russian)
2. Grechischev S. E., Chistotinov L. V., Shur Y. L. *Kriogennye fiziko-geologicheskie processy i ih prognoz* [Cryogenic physical and geological processes and their forecast]. Moscow, Nedra Publ., 1980, 382 p. (in Russian)
3. Deryagin B. V., Churayev H. V. *Termokristallizatsionny perenos vlagi v promerzayushchih poristyh telah* [Thermocrystallization moisture transfer in freezing porous bodies]. *Teplo- i massoobmen = Heat and Mass Transfer*, 1980, vol. 7, pp. 3–10. (in Russian)
4. Deryagin B. V., Churayev N. V. *Techenie nezamerzayushchih prosloek vody i moroznoe razrushenie poristyh tel* [Flow of non-freezing water layers and frost damage of porous bodies]. *Kolloidnyy zhurnal = Colloid Journal*, 1980, vol. 42, no. 5, pp. 842–852. (in Russian)
5. Ershov E. D., Cheverev V. G., Lebedenko Y. P. *Eksperimental'noe issledovanie vlagoperenosa v gruntah pri ih promerzanii v usloviyah "otkrytoj" i "zakrytoj" sistemy* [Experimental study of moisture transfer in soils during their freezing under conditions of "open" and "closed" system]. *Merzlotnye issledovaniya = Permafrost Research*, 1978, iss. 17. Moscow, Moscow University Publ., pp. 197–206. (in Russian)
6. Komarov I. A. *Termodinamika i teplomassoobmen v dispersnyh merzlyh porodah* [Thermodynamics and heat and mass transfer in dispersed frozen rocks]. Moscow, Sci. World Publ., 2003, 608 p. (in Russian)
7. Kudryavtsev S. A. *Chislennoe modelirovanie processa promerzaniya, moroznogo pucheniya i ottaivaniya gruntov* [Numerical modeling of the process of freezing, frost heaving and thawing of soils]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov = Bases, foundations and soil mechanics*, 2004, no. 5, pp. 21–26. (in Russian)
8. Orlov V. O., Dubnov Y. D., Merenkov N. D. *Moroznoe puchenie promerzayushchih gruntov i ego vliyanie na fundamenty sooruzhe* [Frost heaving of freezing soils and its influence on the foundations of structures]. Leningrad, 1977, 183 p. (in Russian)
9. Permyakov P. P. *Identifikatsiya parametrov matematicheskoy modeli teplovlagoperenosa v merzlyh gruntah* [Identification of the parameters of the mathematical model of heat and moisture transfer in frozen soils]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989, 84 p. (in Russian)
10. Cheverev V. G. *Priroda kriogennykh svoystv gruntov* [Nature of cryogenic properties of soils]. Moscow, Sci. World Publ., 2004, 234 p. (in Russian)
11. Brovka G. P., Agutin K. A., Murashko A. A. *Matematicheskie modeli i metody eksperimental'nogo issledovaniya processov teplomas-soperenosa i pucheniya pri promerzanii gruntov* [Mathematical models and methods of the experimental study of the processes of heat-mass transfer and swelling at ground freezing]. *Inzhenernaya geologiya = Engineering geology*, 2021, vol. XVI, no. 4, pp. 62–71. (in Russian)
12. Brovka G. P. *Teplo- i massoperenos v prirodnyh dispersnyh sistemah pri promerzanii* [Heat and mass transfer in natural disperse systems at freezing]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1991, 189 p. (in Russian)
13. Brovka G. P. *Vzaimosvyazannye processy teplo- i massoperenosa v prirodnyh dispersnyh sredah* [Interconnected processes of heat and mass transfer in natural disperse media]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2011, 362 p. (in Russian)
14. Brovka G. P., Dedyulya I. V., Agutin K. A. *Metodologicheskie voprosy issledovaniya i prognozirovaniya moroznogo pucheniya gruntov* [Methodological issues of research and forecasting of frost heaving of soils]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Inzhenerno-geologicheskie zadachi sovremennosti i metody ih resheniya"*. Moskva, 13–14 aprelya 2017 g. [Proc. of the sci. and pract. conf. "Engineering and geological problems of our time and methods of their solution"]. Moscow, April 13–14, 2017. Moscow, 2017, pp. 178–185. (in Russian)

Информация об авторах

Агутин Кирилл Алексеевич – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kirill.agutin@gmail.com

Бровка Геннадий Петрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: brovka_gp@tut.by

Дедюля Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: dedulyaivan@yandex.by

Information about the authors

Kirill A. Agutin – Researcher, Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus, (10, F. Skoryna Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kirill.agutin@gmail.com

Gennady P. Brovka – D. Sc. (Technical), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, (10, F. Skoryna Str., Minsk, 220076, Belarus). E-mail: brovka_gp@tut.by

Ivan V. Dedyulya – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: dedulyaivan@yandex.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-20251-159-167>
УДК 619.614.31:637.5'64

Поступила в редакцию 30.04.2025
Received 30.04.2025

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛИРОВАНИЯ НА СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОРФА

А. Э. Томсон, Т. Я. Царюк, Т. В. Соколова,
Ю. Ю. Навоша, В. С. Пехтерева, А. С. Марзан

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Проведено гранулирование образцов торфа различной влажности методом экструзии на шнековом и матричном грануляторах. Установлено, что для гранулирования на шнековом грануляторе оптимальная влажность находится в пределах 60–73 %, а для матричного (пеллетера) – 21–35 %. Показано, что по сорбционным свойствам и скорости поглощения из газовой фазы водного раствора аммиака, воды и аммиака образцы гранулированного торфа более эффективны по сравнению с исходным торфом. Изучение кинетики поглощения выявило, что наряду с механизмом непосредственного взаимодействия аммиака с карбоксильными, фенольными и другими реакционно-способными группами органического вещества торфа значительный вклад в общее поглощение аммиака вносит закрепление аммиака за счет менее прочных форм связи. Показано, что химически, т. е. в обменной и в форме малоподвижных химических соединений, закрепляется около 8 % сорбированного аммиака. Спектральными методами подтверждено, что связывание аммиака торфом обусловлено прочным ионообменным взаимодействием со свободными карбоксильными группами до практически полного их замещения ионами аммония, а также образованием водородных связей аммиака со структурной матрицей торфа. Установлено влияние на сорбционные и водно-физические свойства диаметра гранул, полученных методом экструзии на шнековом грануляторе: с увеличением диаметра гранул водопоглощение и сорбционные свойства повышаются, что связано с получением более рыхлой структуры и большей доступностью центров сорбции.

Ключевые слова: торф; экструзионный метод гранулирования; шнековый и матричный грануляторы; аммиак; сорбция; кинетика.

Для цитирования. Томсон А. Э., Царюк Т. Я., Соколова Т. В., Навоша Ю. Ю., Пехтерева В. С., Марзан А. С. Влияние гранулирования на сорбционные свойства торфа // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 159–167.

THE EFFECT OF GRANULATION ON THE SORPTION PROPERTIES OF PEAT

A. E. Thomson, T. Ya. Tsaryuk, T. V. Sokolova,
Yu. Yu. Navosha, V. S. Pekhtereva, A. S. Marzan

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

Abstract. The granulation of peat samples of various humidity was carried out by extrusion on screw and matrix granulators. It was found that for granulation on a screw granulator, the optimal humidity is in the range of 60–73 %, and for a matrix (pellet) – 21–35 %. It is shown that in terms of sorption properties and absorption rate from the gas phase of an aqueous solution of ammonia, water and ammonia, samples of granular peat are more effective than the original peat. The study of absorption kinetics has shown that, along with the mechanism of direct interaction of ammonia with carboxylic, phenolic and other reactive groups of peat organic matter, a significant contribution to the total absorption of ammonia is made by the fixation of ammonia due to less strong forms of bonding. Chemically, i. e., about 8 % of the sorbed ammonia is fixed in the exchange and in the form of inactive chemical compounds. Spectral methods have confirmed that the binding of ammonia by peat is due to a strong ion-exchange interaction with free carboxyl groups until they are almost completely replaced by ammonium ions, as well as the formation of hydrogen bonds of ammonia with the structural matrix of peat. The effect on the sorption and water-physical properties of the diameter of granules obtained by extrusion on a screw granulator has been established: with an increase in the diameter of granules, water absorption and sorption properties increase, which is associated with a looser structure and greater accessibility of sorption centers.

Keywords: peat; extrusion granulation method; screw and matrix granulators; ammonia; sorption; kinetics.

For citation. Thomson A. E., Tsaryuk T. Ya., Sokolova T. V., Navosha Yu. Yu., Pekhtereva V. S., Marzan A. S. The effect of granulation on the sorption properties of peat. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 159–167.

Введение. Специфические условия промышленного содержания птицы, выражающиеся в концентрации значительного поголовья разновозрастной птицы на небольших ограниченных площадях, использование безоконных птичников, в которых выращивается одновременно по 20–25 тыс. голов бройлеров, особенно при использовании клеточной технологии, требуют чрезвычайно внимательного отношения к соблюдению нормативных гигиенических параметров. За счет естественных процессов концентрация пыли в воздухе выводного шкафа на инкубаторах достигает 35 мг/дм^3 , при нормативе для воздуха птичников $1,9\text{--}2,0 \text{ мг/дм}^3$. Кроме того, в запыленной воздушной среде могут присутствовать патогенные микроорганизмы, а слабо развитая в этот период иммунная система не в состоянии преодолеть «наступление» микрофлоры. Цыпленок заболевает, культивирует в себе возбудителя и передает его сверстникам. В связи с этим контроль за запыленностью воздуха в помещении птицефабрик должен осуществляться очень тщательно. Поэтому применение на птицефабриках различного рода подстилочных средств должно базироваться на принципах недопущения дополнительного количества пыли.

Сегодня в промышленных условиях торф добывается путем фрезерования верхнего слоя залежи, а следовательно, содержит большое количество пылевидной фракции (до 50 % фракции $<0,5 \text{ мм}$). Требования, предъявляемые к качеству воздушной среды на птицефабриках, не позволяют использовать материалы, повышающие запыленность воздуха. В связи с этим разработка технологии получения специальных гранулированных форм торфа, сочетающих основные свойства природного материала (высокие значения водопоглощения, газопоглощения и биоцидности) с улучшенными физико-механическими свойствами композитов, является актуальной.

Любые порошкообразные материалы и их композиции могут быть определенным способом сгранулированы [1]. Гранулирование проводят с целью улучшения качества как промежуточных, так и готовых продуктов. В зависимости от нужной структуры и свойств гранулированных материалов, предъявляемых требований к продукту и технико-экономических обоснований применяют различные способы гранулирования [2].

Формование методом экструзии – процесс переработки материала путем размягчения или пластификации и придания формы продавливанием через экструзионную головку. В процессе экструзионной обработки под действием значительных скоростей сдвига, высоких температур и давления происходит превращение механической энергии в тепловую, что ведет к различным по глубине изменениям основных компонентов перерабатываемого сырья. Формование методом экструзии возможно на шнековом или матричном грануляторе.

Цель работы – изучить влияние гранулирования на физико-технические и сорбционные свойства торфа.

Объекты и методы исследования. Для проведения исследований использовали верховой пушицевый торф месторождения «Туршевка-Чертово» степенью разложения 40–45 %, фракции 0,5–3,0 мм. При обосновании оптимальных параметров гранулирования торфа с целью определения диапазона влажности, обеспечивающего получение гранул требуемого качества, подготовлены образцы торфа с влажностью от 20 до 80 %.

Гранулирование осуществляли на шнековом грануляторе и матричном грануляторе (пеллетере) с диаметром фильер 5 мм.

С целью оценки влияния формования на сорбционные свойства торфа провели сравнительное исследование физико-технических и сорбционных свойств исходного и гранулированного экструзионным способом торфа по отношению к водному раствору аммиака и воде в статических условиях.

Количество поглощенных из газовой фазы водного раствора аммиака, воды и аммиака оценивали весовым методом. Для этого чашки Петри с навеской торфа 10,0 г помещали в эксикаторы, содержащие 100 мл водного раствора аммиака (25 %) или такое же количество дистиллированной воды. Через определенное время чашки Петри извлекали и взвешивали с точностью до четвертого знака. По результатам взвешиваний рассчитывали количество поглощенного водного раствора аммиака или воды на абсолютно сухое вещество торфа. Количество поглощенного аммиака оценивали по разности между привесом водного раствора аммиака и воды. Длительность эксперимента составила 30 сут (720 ч).

Результаты исследования и их обсуждение. Эффективность формования и качество полученных гранул оценивали визуально. Результаты представлены в табл. 1, из анализа данных которой следует, что диапазон влажности гранулируемого торфа, обеспечивающий получение гранул удовлетворительного качества, для шнекового гранулятора составляет 60–73 %, а для матричного – 21–35 %.

Результаты оценки физико-технических свойств исходного и гранулированного торфа показали (табл. 2), что при использовании матричного гранулятора получают наиболее плотные гранулы, а это существенно ухудшает их водно-физические свойства (водопоглощение уменьшается в 2 раза по сравнению с исходным негранулированным торфом). В то же время в результате грануляции сорбционные свойства торфа заметно повышаются по сравнению с фрезерным торфом, но способ гранулирования практически не влияет на эту характеристику.

Таблица 1. Результаты определения диапазона влажности при гранулировании торфа на разных устройствах**Table 1. Results of determining the humidity range during peat granulation on different devices**

Шнековый гранулятор		Матричный гранулятор	
Влажность формируемой смеси	Результат	Влажность формируемой смеси	Результат
45,8	Не формируется	25,4	Гранулы влажностью 23,8 %
55,0	То же	28,0	Гранулы влажностью 26,4 %
61,8	Гранулы влажностью 61,2 %	30,4	Гранулы влажностью 29,4 %
66,0	Гранулы влажностью 65,7 %	35,1	Гранулы влажностью 33,8 %
70,3	Гранулы влажностью 69,4 %	40,1	Залипание отверстий
75,4	Залипание отверстий	–	–

Таблица 2. Физико-технические и сорбционные свойства исходного и гранулированного торфа**Table 2. Physico-technical and sorption properties of the initial and granular peat**

Способ гранулирования	Влажность, %	Насыпная плотность, г/см ³	Водопоглощение, %	Поглощение водного раствора аммиака за 48 ч, мг/г а. с.
Исходный торф фракции 0,5–3,0 мм	11,8	315,8	163,2	107,2
Шнековый гранулятор	12,1	376,9	137,8	153,3
Матричный гранулятор	10,3	450,4	84,9	158,8

Результаты эксперимента по оценке кинетики сорбции водного раствора аммиака, воды и аммиака из газовой фазы представлены на рис. 1.

Известно, что раствор аммиака в воде обладает щелочной реакцией, которая происходит, так как часть молекул NH_3 соединяется с водой и образует гидроксид-ионы, согласно уравнению реакции $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$ и далее $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{NH}_4\text{OH}$.

Таким образом, в системе устанавливается равновесие $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{NH}_4\text{OH}$, где содержатся молекулы NH_3 , ионы NH_4^+ и OH^- , а также молекулы NH_4OH . Установлено, что основная масса растворенного аммиака находится в растворе в виде молекул NH_3 ; присутствием других компонентов можно пренебречь.

Из представленных на рис. 1 данных следует, что ход кривых кинетики поглощения водного раствора аммиака и молекул аммиака схож. Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальная скорость поглощения водного раствора аммиака и молекул аммиака наблюдается в начале сорбции. Первые порции аммиака вступают во взаимодействие со свободными карбоксильными группами. Это приводит к смещению существующего равновесия и протеканию ионообменных процессов. Далее следуют более пологие участки, а затем – некоторый подъем кривых. С ростом pH дисперсионной среды во взаимодействие вступают менее активные фенольные гидроксилы. Скорость взаимодействия при этом немного падает. Однако процесс поглощения аммиака и его водного раствора не прекращается. Такая особенность сорбционного взаимодействия объясняется, по-видимому, тем, что по мере накопления аммиака и влаги становятся доступными для взаимодействия все новые функциональные группы. Так как торф относится к сорбентам с высокой подвижностью «каркаса» надмолекулярных структур, с ростом pH и количества одновалентных катионов NH_4^+ в дисперсионной среде органические компоненты торфа интенсивно набухают, что и вызывает появление новых центров сорбции.

Также из данных на рис. 1 следует, что гранулирование торфа оказывает положительное влияние на процесс поглощения указанных выше компонентов, причем наибольший эффект наблюдается на образце, сформированном на матричном грануляторе. Процесс поглощения из газовой фазы водного раствора аммиака и воды можно разделить на две составляющие: сорбцию и десорбцию. Так как гранулы, полученные на пеллетере, более плотные, процесс десорбции протекает менее интенсивно по сравнению с десорбцией изучаемых компонентов из исходного торфа и гранул, полученных на шнековом грануляторе.

На рис. 2 представлены кривые скорости поглощения из газовой фазы водного раствора аммиака, аммиака и воды торфом фракции 0,5–3,0 мм, формованными гранулами и пеллетами. Из анализа данных следует, что скорость поглощения аммиака и воды пеллетами выше, чем гранулами и торфом фракции 0,5–3,0 мм. При этом скорость поглощения гранулами и пеллетами примерно одинакова и значительно отличается от скорости поглощения указанных компонентов торфом в первые 50 ч (3 сут) сорбции. Спустя примерно 400 ч (17 сут) эксперимента скорости сорбции выравниваются.

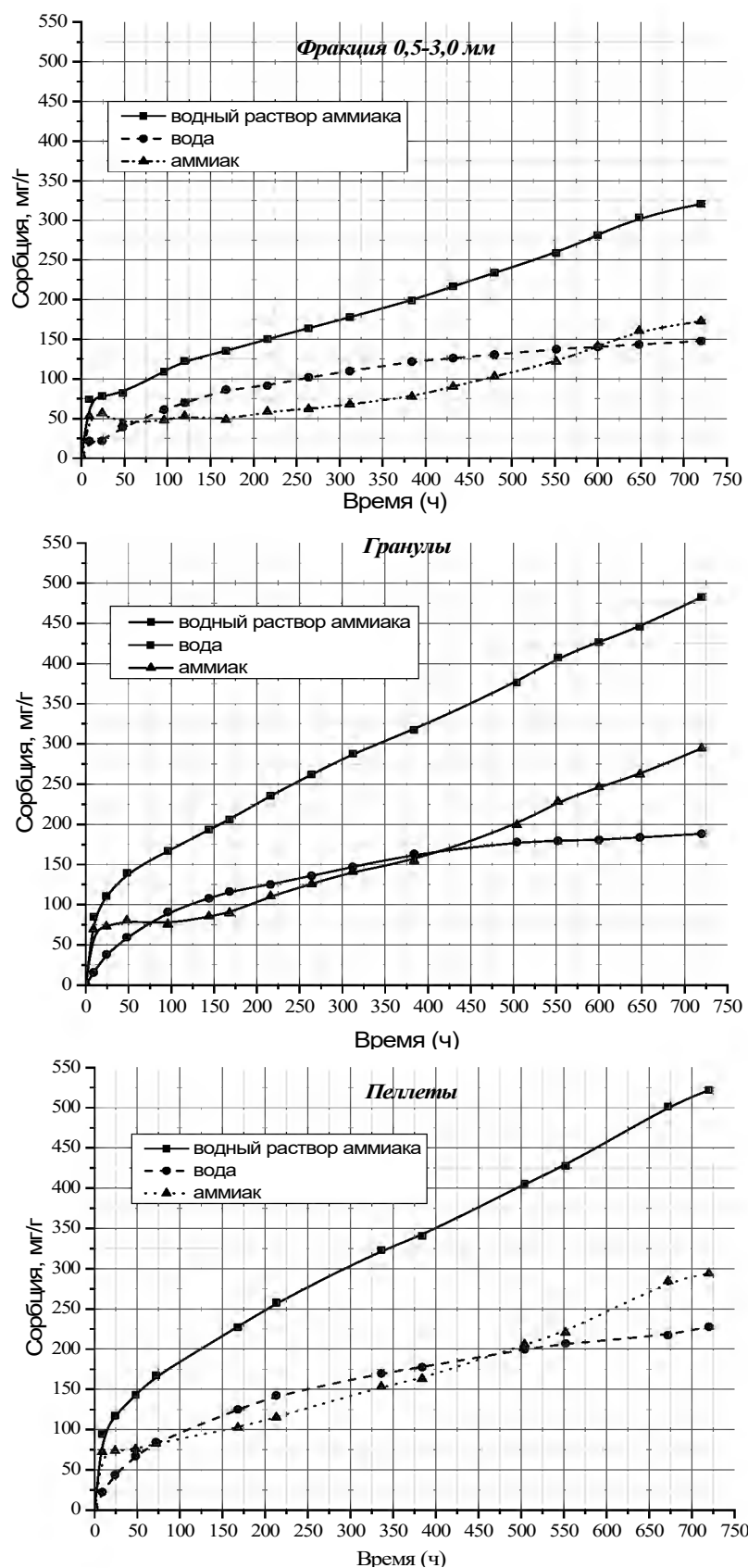


Рис. 1. Влияние способа формирования на сорбционные свойства торфа

Fig. 1. Influence of the molding method on the sorption properties of peat

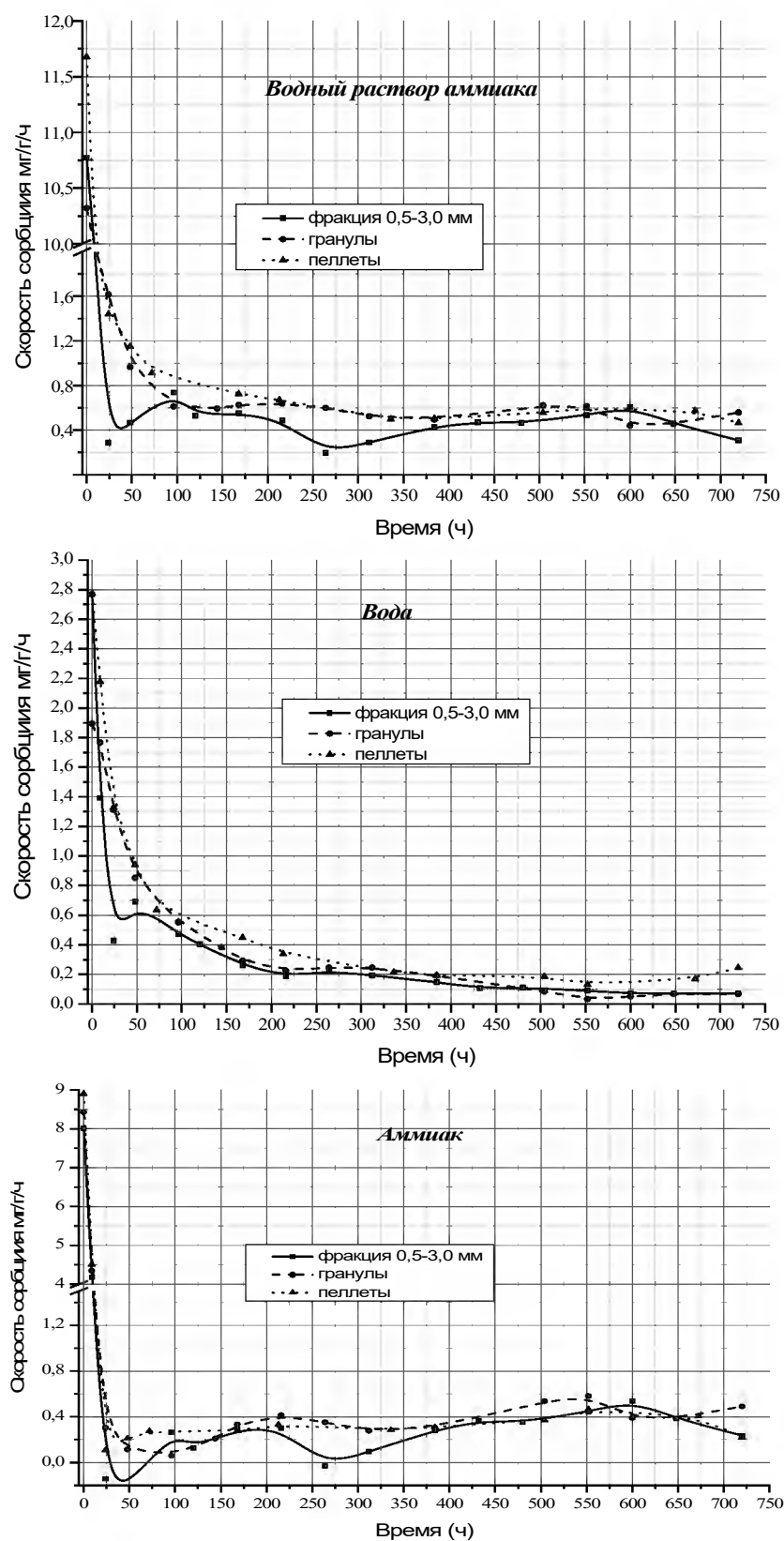


Рис. 2. Скорость сорбции торфом паров аммиака и воды из газовой фазы в зависимости от способа гранулирования

Fig. 2. The rate of sorption of ammonia and water vapor from the gas phase by peat, depending on the granulation method

Для выяснения вклада в величину сорбционной емкости химически закрепленных, а также физически и физико-химически связанных аммиака и воды образцы торфа подвергали выветриванию и сушке при температуре 105 °С до постоянного веса, результаты чего представлены на рис. 3 и 4.

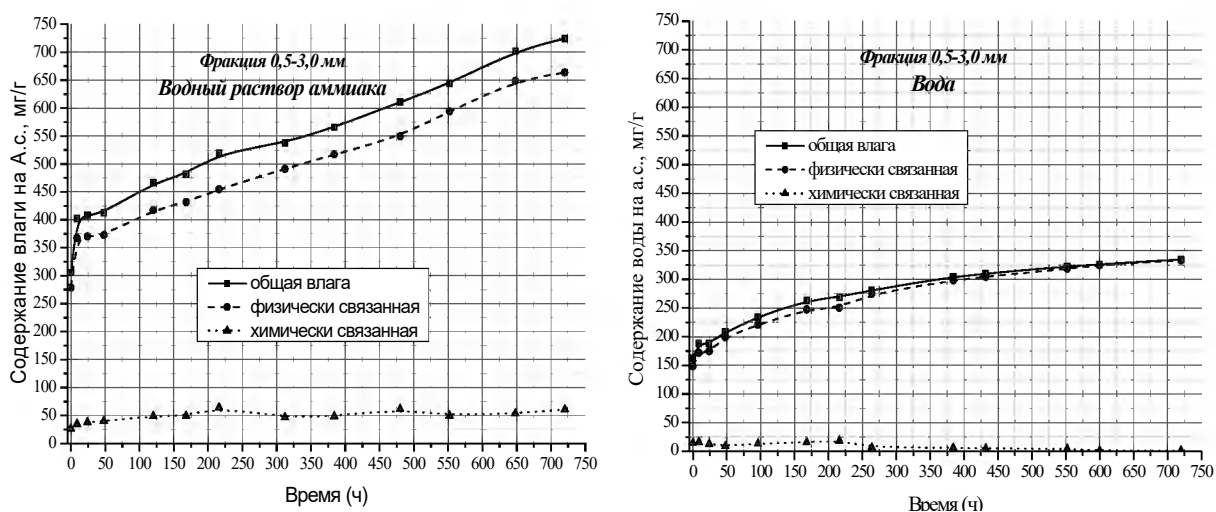


Рис. 3. Общая, физическая и химическая сорбция водного раствора аммиака и воды в газовой фазе торфом фракции 0,5–3,0 мм

Fig. 3. General, physical and chemical sorption of an aqueous solution of ammonia and water in the gas phase by peat of 0.5–3.0 mm fraction

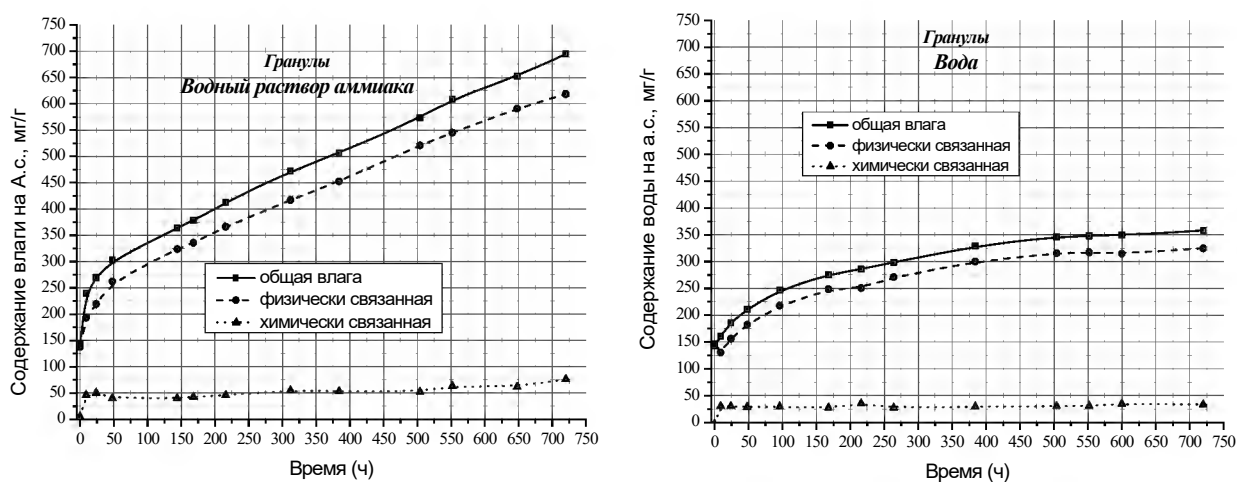


Рис. 4. Общая, физическая и химическая сорбция водного раствора аммиака и воды в газовой фазе гранулированным торфом

Fig. 4. General, physical and chemical sorption of an aqueous solution of ammonia and water in the gas phase by granular peat

Из анализа данных следует, что химически, т. е. в обменной и в форме малоподвижных химических соединений, закрепляется около 8 % сорбированного аммиака. Остальной физически и физико-химически связанный аммиак (92 %) выветривается вместе с влагой при сушке.

Таким образом, наряду с механизмом непосредственного химического взаимодействия аммиака с карбоксильными, фенольными и другими реакционно-способными функциональными группами органического вещества торфа значительный вклад в общее поглощение вносит закрепление аммиака за счет менее прочных форм связи.

С целью выяснения прочности связывания аммиака с торфом образцы торфа после сорбции аммиака подверглись выдержке в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 1, 2 и 3 ч и были исследованы методом ИК-спектроскопии. На рис. 5 представлены ИК-спектры данных образцов.

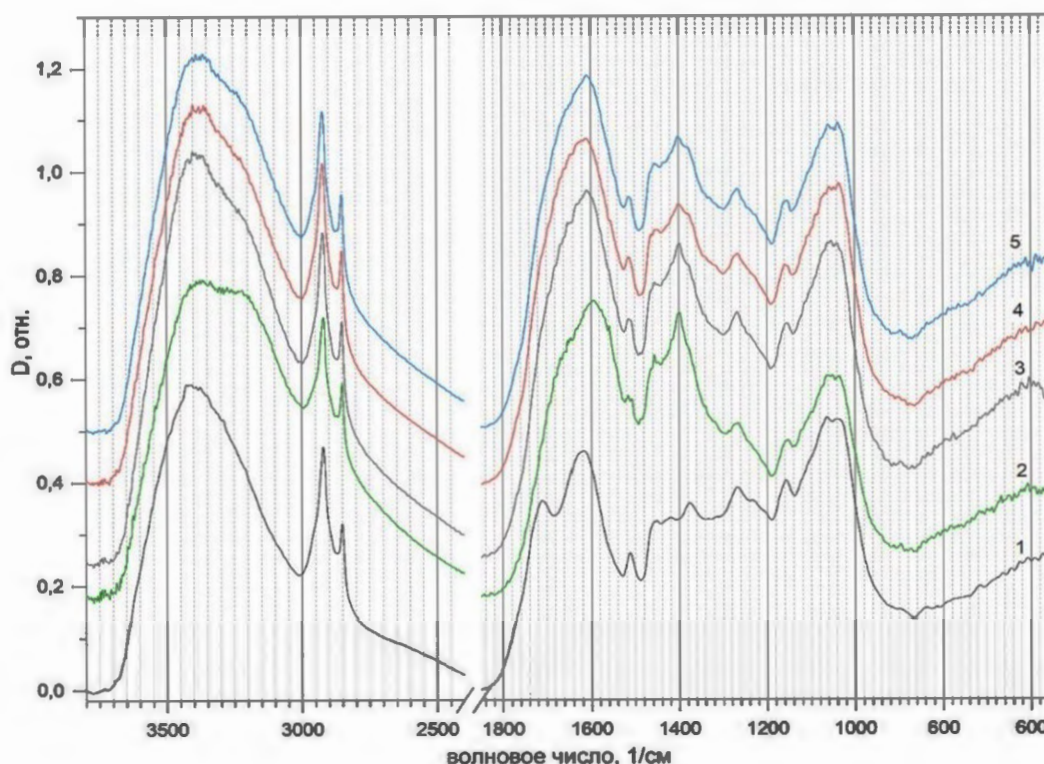


Рис. 5. ИК-спектры образцов торфа после сушки их при температуре 105 °С:
1 – исходный образец торфа; 2 – образец торфа после сорбции аммиака; 3 – образец торфа после сорбции аммиака, выдержка 1 ч; 4 – образец торфа после сорбции аммиака, выдержка 2 ч; 5 – образец торфа после сорбции аммиака, выдержка 3 ч

Fig. 5. IR spectra of peat samples after drying at 105 °C:
1 – initial peat sample; 2 – peat sample after ammonia sorption; 3 – peat sample after ammonia sorption, exposure of 1 hour; 4 – peat sample after ammonia sorption, exposure of 2 hours; 5 – peat sample after ammonia sorption, exposure of 3 hours

Как следует из представленных данных, сорбция аммиака приводит к практически полному исчезновению полосы поглощения свободных карбоксильных групп (1708 см^{-1}), при этом появляются полосы поглощения в области 1600 и 1400 см^{-1} – асимметричные и симметричные колебания карбоксилат-ионов. Одновременно растет поглощение в области 3200 см^{-1} – валентные колебания -NH водородных связей ионов аммония. Выдерживание образца после сорбции аммиака в течение 1 ч при температуре 105 °C не приводит к появлению полосы при 1708 см^{-1} , но наблюдается уменьшение интенсивности поглощения при 3200 см^{-1} . Одновременно изменяется соотношение интенсивности полос при 1600 и 1400 см^{-1} . Выдерживание образца с сорбированным аммиаком при 2 и 3 ч при температуре 105 °C практически не приводит к заметным изменениям в спектрах.

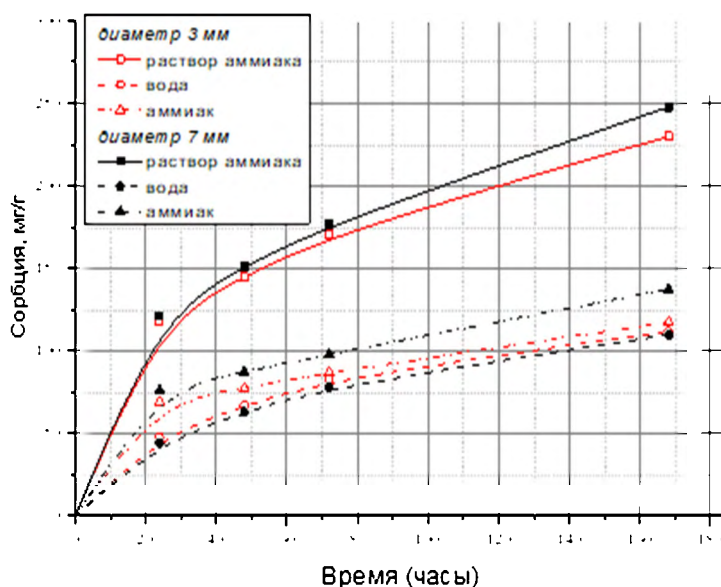
Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что уже при выдержке в 1 ч происходит удаление практически всего слабо связанного аммиака из структуры торфа. Это подтверждается уменьшением интенсивности полосы в области 3200 см^{-1} и изменением соотношения интенсивностей полос 1600 и 1400 см^{-1} . Полоса 1400 см^{-1} – валентные колебания иона аммония. Аммиак, связанный ионными связями с карбоксильными группами, не удаляется. Отсутствие изменения в спектрах образцов, выдержанных при 2 и 3 ч, свидетельствует о прочности связей оставшегося количества аммиака.

Что касается сорбции воды, то 99,5 % в общее поглощение вносят физическая и физико-химическая составляющие и только около 0,5 % – химическое взаимодействие молекул воды с функциональными группами торфа (см. рис. 3, 4).

С целью определения оптимального размера гранул при использовании последних в качестве компонента подстилки при напольном выращивании цыплят-бройлеров проведено гранулирование торфа методом экструзии на шнековом грануляторе с размером отверстий фильеры в кольцевой матрице (фильерной плите) 3, 5 и 7 мм. Изучены физико-технические, водно-физические и сорбционные свойства полученных гранул (табл. 3 и рис. 6).

Таблица 3. Физико-технические и сорбционные свойства гранулированного торфа**Table 3. Physico-technical and sorption properties of granular peat**

Размер отверстия фильеры, мм	Влажность, %	Диаметр гранулы, мм	Насыпная плотность, г/см ³	Водопоглощение, %	Поглощение водного раствора аммиака за 48 ч, мг/г
3	12,5	2,0	492,0	103,6	145,2
5	13,0	3,5	450,0	137,8	145,6
7	12,6	5,0	347,0	150,8	151,5

**Рис. 6. Кинетика сорбции в зависимости от размера гранул торфа****Fig. 6. Sorption kinetics depending on the size of peat granules**

Анализ представленных данных свидетельствует, что с увеличением диаметра гранул водопоглощение и сорбция водного раствора аммиака увеличиваются, что, по-видимому, связано с получением гранулированного материала более рыхлой структуры, а следовательно, с большей доступностью центров сорбции.

Таким образом, рекомендуется гранулировать торф на шнековом грануляторе, используя кольцевую матрицу с диаметром фильеры не менее 7 мм.

На основании проведенных исследований установлено, что для применения торфа в качестве компонента в глубокую подстилку при напольном содержании птицы необходимо его гранулирование. При этом уменьшается запыленность помещения и улучшаются сорбционные свойства торфа.

Список использованных источников

1. Ринкевич, В. П. Анализ способов получения и рецептур гранулированных композитов различного назначения на основе торфа / В. П. Ринкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2007. – № 4 (17). – С. 172–179.
2. Чистый, И. Н. Производство гранулированного торфа / И. Н. Чистый. – Минск : Наука и техника, 1980. – 144 с.

References

1. Rinkevich V. P. *Analiz sposobov polucheniya i receptur granulirovannykh kompozitov razlichnogo naznacheniya na osnove torfa* [Analysis of methods of obtaining and formulations of granulated composites for various purposes on the basis of peat]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo-universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2007, no. 4 (17), pp.172–179. (in Russian)
2. Chistyj I. N. *Proizvodstvo granulirovannogo torfa* [Production of granulated peat]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1980, 144 p. (in Russian)

Информация об авторах

Томсон Алексей Эммануилович – кандидат химических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией экотехнологий, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: altom@nature-nas.by

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

Соколова Тамара Владимировна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tomsok49@tut.by

Навоша Юльян Юльянович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: navoscha@tut.by

Пехтерева Виктория Станиславовна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: pehvik@yandex.ru

Марзан Анастасия Сергеевна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: marr_29@mail.ru

Information about the authors

Alexey E. Tomson – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Deputy Director, Head of Lab of Ecotechnology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: altom@nature-nas.by

Tatiana Ya. Tsaryuk – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tsariuk9@mail.ru

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 Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tomsok49@tut.by

Yulian Yu. Navoscha – Ph. D. (Physical and Mathematical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: navoscha@tut.by

Victoriya S. Pehtereva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: pehvik@yandex.ru

Anastasiya S. Marzan – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: marr_29@mail.ru

ОЦЕНКА ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Н. Е. Сосновская, В. А. Ракович, О. Г. Красноберская, Е. А. Добринец

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Изучено влияние добавок соломы, льнотресты и опилок, а также биослама биогазовых установок на трансформацию органического вещества в ходе биотехнологической переработки. Показано, что групповой состав исследуемых смесей изменяется с увеличением содержания гуминовых веществ (ГВ) на 3,5–39,8 % и снижением содержания трудногидролизующихся ГВ на 35,0–79,9 % для всех исследованных композиций по сравнению с исходным содержанием. В процессе компостирования смесей снижается содержание водорастворимых веществ (ВРВ) в вариантах с опилками и соломой на 15,3 и 3,9 %, а в вариантах с биосламом и льнотрестой содержание ВРВ возрастает на 18,3 и 1,8 % соответственно. Для всех исследованных составов, за исключением варианта с соломой, характерно увеличение содержания гуминовых кислот (ГК) в водных экстрактах с ростом температуры сушки гранул органоминеральных удобрений. Максимальное содержание ГК наблюдается в водных экстрактах гранул удобрений на основе компоста с соломой и достигает 2,39 % на сухое вещество. В варианте с биосламом содержание ГК в водных экстрактах составляет 1,37 и 1,85 % при температуре сушки гранул 90 и 110 °С соответственно, что позволяет рекомендовать полученные биокомпосты на основе вторичного сырья для получения гранулированных органоминеральных удобрений.

Ключевые слова: гранулированные органоминеральные удобрения; биокомпосты; вторичное сырье; гуминовые вещества.

Для цитирования. Сосновская Н. Е., Ракович В. А., Красноберская О. Г., Добринец Е. А. Оценка трансформации органического вещества при биотехнологической переработке вторичного сырья для получения гранулированных органоминеральных удобрений // Природопользование – 2025. – № 1. – С. 168–179.

EVALUATION OF ORGANIC MATTER TRANSFORMATION DURING BIOTECHNOLOGICAL PROCESSING OF SECONDARY RAW MATERIALS FOR PRODUCTION OF GRANULATED ORGANOMINERAL FERTILIZERS

N. E. Sosnovskaya, V. A. Rakovich, O. G. Krasnoberskaya, E. A. Dobrinets

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

Abstract. The influence of straw, flax, and sawdust additives, as well as bio sludge from biogas plants on the transformation of organic matter during biotechnological processing has been studied. It is shown that the group composition of the studied mixtures changes with the increase of humic substances (HS) content by 3.5–39.8 % and decrease of difficult hydrolysable HS content by 35.0–79.9 % for all the studied compositions in comparison with the initial one. In the process of composting of mixtures, the content of water-soluble substances (WSS) decreased in variants with sawdust and straw by 15.3 and 3.9 %, and in variants with bio sludge and flax thistle the content of WSS increased by 18.3 and 1.8 %, respectively. For all investigated compositions, except for the variant with straw, the increase of humic acid (HA) content in aqueous extracts with increasing drying temperature of organomineral fertilizer granules is characteristic. The maximum HA content is observed in aqueous extracts of fertilizer granules based on compost with straw and amounts to 2.39 % of dry matter. In the variant with bio sludge, the content of HA in aqueous extracts was 1.37 and 1.85 % at the drying temperature of granules 90 and 110 °C, respectively, which allows us to recommend the obtained bio-composts based on secondary raw materials for the production of granular organomineral fertilizers.

Keywords: granular organomineral fertilizers; biocomposts; secondary raw materials; humic substances.

For citation. Sosnovskaya N. E., Rakovich V. A., Krasnoberskaya O. G., Dobrinets E. A. Evaluation of organic matter transformation during biotechnological processing of secondary raw materials for the production of granulated organomineral fertilizers. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 168–179.

Введение. Одной из многочисленных экологических проблем современной цивилизации является утилизация отходов производства и потребления, в том числе осадка сточных вод, биошлама биогазовых установок, опилок, льнотресты. В контексте устойчивого развития наиболее перспективным способом их утилизации является компостирование. Компост не только обогащает почву гумусом и питательными веществами, но и улучшает ее структуру. Благодаря этому почва становится более рыхлой: она проницаема для воздуха и удерживает нужное количество воды.

Для более рационального и эффективного использования перспективно готовить компосты из смеси навоза с влагопоглощающими органосодержащими материалами (опилками, лигнином, корой, соломой злаковых культур), которые также являются массовыми отходами сельского хозяйства, деревообрабатывающей промышленности. Полученные компосты можно применять для удобрения земель, отводимых под посадки древесно-кустарниковых насаждений, питомников, парков; под долголетние культурные сенокосно-пастбищные угодья; под технические культуры, а также при рекультивации земель. Смеси каустобиолитов с навозом отличаются значительно большей вариабельностью органических составляющих, их биологической активностью и повышенным содержанием водорастворимых питательных элементов для растений.

Объединение в сложные компосты отходов с различными морфологическими и химическими свойствами, отличающимися плотностью и влажностью, химическим и биологическим составом, определяет значительные колебания численности различных микроорганизмов [1]. В сложных компостах формируются сообщества микроорганизмов с самыми разными функциями. При смешивании различных отходов по истечении одной – двух недель развития организмы довольно быстро объединяются в функциональные группы по использованию в качестве ресурса органического вещества и его трансформацию в гумус, а также в органические кислоты, аминокислоты, ферменты и другие соединения [2]. В биомассе сложного компоста доля микроорганизмов в составе органического вещества доходит до весьма значительных величин, что существенно удлиняет круговорот углерода и азота [3]. Продуманная компоновка различных отходов в сложном компосте выравнивает реакцию среды сложного комплекса на основе химической реакции нейтрализации в целом всей подобранной смеси [4].

Особая ценность соломы как органического удобрения состоит в присущем ей высоком коэффициенте гумификации, в результате которой из 1 т соломы может синтезироваться около 180 кг гумуса, в то время как из 1 т соломистого навоза образуется всего 50–60 кг гумуса [3]. Однако разложение соломы в почве тормозится из-за низкого содержания доступного для микроорганизмов источника углерода. Поэтому предварительное компостирование соломы перед внесением в почву повышает ее удобрительную ценность. Одним из способов компостирования соломы является применение в качестве стимулятора протекающих микробиологических процессов легкогидролизуемого органического вещества (ЛГВ).

Опилки, как и другие отходы распиливания древесины, являются хорошим материалом для изготовления удобрений и компоста. В зависимости от породы древесины естественное перегнивание в таких условиях составляет 1–3 года, а подъем температуры в компосте составляет 1–5 °С [4]. Добавление к опилкам помета или навоза сокращает время перегнивания до 6–10 месяцев, а добавление препаратов, ускоряющих размножение бифидобактерий, – до 3–5 месяцев. Свежие опилки богаты углеводами и при непосредственном внесении в почву вызывают бурное развитие микроорганизмов, которые для своей жизнедеятельности поглощают из почвы очень много минерального азота. Это обстоятельство вызывает денитрификацию почвы – закрепление в ней азота, и следовательно, временную недоступность его для растений, которых угнетает азотное голодание. Только после отмирания соответствующих поколений микроорганизмов минеральный азот почвы вновь становится доступным растениям [3]. При компостировании опилок с навозом, птичьим пометом и фекалиями азот, образующийся при разложении этих материалов, поглощается опилками. Потери его сокращаются, кроме того, в компостах с опилками улучшаются физические свойства фекалий и птичьего помета [5].

Особенным видом альтернативной энергии является получение и использование биогаза. В биогазовой установке субстраты (отходы разных видов) поступают в биореактор, где находятся специальные бактерии, в результате жизнедеятельности которых образуется конечный газ – метан. В качестве исходного материала могут выступать различные растительные отходы, навоз, птичий помет, древесные и бытовые отходы [6, 7]. После брожения отходов нитраты и нитриты в них переходят в более безопасный аммонийный азот. Кроме того, другие базовые питательные элементы – фосфор и калий – почти полностью остаются в шламе [8].

Шлам после производства биогаза посредством анаэробного брожения органических отходов может быть использован как основа органических удобрений. Удобрения, полученные из шлама после анаэробного сбраживания отходов, могут быть либо полезными, либо губительными для окружающей среды. Это связано с недостаточно отработанной технологией подготовки органических удобрений к применению. Если биошлам, полученный из птичьего помета, после сепарации может применяться

в жидком виде для полива при выращивании сельскохозяйственных культур, а твердая фракция после сушки превращаться в гранулированное удобрение [8], то при использовании в качестве сырья бытовых отходов необходимо разбавлять полученный биошлам другими видами удобрений для предотвращения негативного влияния на окружающую среду.

Согласно Национальной стратегии по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами в Республике Беларусь к 2035 г. уровень использования органической части твердых коммунальных отходов (ТКО) (компостирование и биогаз) должен составить 23 %. В настоящее время доля компостирования отходов в нашей стране не превышает 1,5 % [9].

Переработанные в биогазовых установках органические отходы превращаются в биомассу, которая содержит значительное количество питательных веществ и может быть использована в качестве биоудобрения и кормовых добавок. Гумусные материалы, образующиеся при сбраживании, улучшают физические свойства почвы, а минеральные вещества служат источником энергии и питанием для деятельности почвенных микроорганизмов, что способствует повышению усвоения питательных веществ растениями. Основное преимущество биоудобрений заключается в сохранении в легко усваиваемой форме практически всего азота и других питательных веществ, содержащихся в исходном сырье. Значительным преимуществом биоудобрений перед навозом, перепревшим в естественных условиях, является то, что при сбраживании навоза в биогазовых установках погибает значительная часть яиц гельминтов, патогенных микроорганизмов и семян сорняков, содержащихся в навозе [10, 11].

Важными органическими веществами, присутствующими в биоудобрениях, являются гуминовые кислоты (ГК). Они повышают сопротивляемость растений неблагоприятным условиям внешней среды: засухе, высоким и низким температурам, токсичным веществам (пестицидам, гербицидам, тяжелым металлам), повышенной радиации. ГК способствуют повышению всхожести семян, ускорению роста и развития растений, сокращению вегетационного периода, более раннему (на 8–10 дней) созреванию и увеличению урожайности сельскохозяйственных культур. Содержание ГК в биоудобрениях составляет от 13 до 28 % на сухое вещество, а их концентрация зависит от температуры процесса сбраживания сырья [11].

Содержание ГК в биоудобрении особо важно для низкогуминовых почв. Применение биоудобрений приводит к быстрой гумификации растительных остатков в почвах, помогает уменьшить уровень эрозии за счет формирования стабильного гумуса и повышает содержание питательных веществ, улучшает гигроскопичность, увеличивает амортизирующие и регенерирующие качества почв.

Применение удобрения в виде гранул имеет ряд преимуществ: на практике внесение гранул менее затратно, чем внесение жидких удобрений или порошков, более продолжителен период воздействия на растения, что крайне важно для веществ с низкой нормой внесения в почву, но с постоянной потребностью их у растений. Гранулирование представляет собой совокупность физико-химических процессов, обеспечивающих формирование частиц нужной формы, размеров, структуры и физических свойств. Данный процесс отвечает за влажность, размер и прочность готового продукта [12].

Цель работы – исследовать трансформацию органического вещества в ходе биотехнологической переработки отходов растениеводства и деревообработки, а также биошлама биогазовых установок в смеси с навозом и торфом с получением биогумуса для обоснования составов новых видов гранулированных органоминеральных удобрений, обеспечивающих экономию питательных веществ за счет уменьшения их вымывания и охрану окружающей среды.

Материалы и методы исследований. Для исследования использовали тростниковый торф низинного типа из торфяного месторождения Гало-Ковалевское, степень разложения 30–35 %, зольность 9,5 %, влажность 52 %. В качестве отходов растениеводства и деревообработки выбраны солома колосовых, льнотреста, опилки и навоз крупного рогатого скота (КРС) бесподстилочный. Биошлам получен на биогазовой станции на РУСП СГЦ «Западный» Брестского района из четырех видов отходов, таких как навозные стоки (30 %), твердая фракция отсепарированных на дуговых ситах навозных стоков с примесью отходов бойни (30 %), отходы рыбного производства (20 %), зерноотходы (10 %) и жидкие ферментированные отходы (10 %) [9].

Динамику качественного и количественного изменения органического вещества в процессе биотехнологической переработки (компостирования) изучали на примере смесей торфа, бесподстилочного навоза КРС с биошлагом биогазовых установок, соломой, опилками и льнотрестой. Соотношение по массе торфа, навоза и добавок – 2 : 2 : 1, общая масса смеси – 2,5 кг. Компостирование осуществляли в термостате при температуре 35 °С, аэрацию смесей проводили каждые две недели, длительность опыта составила 3 месяца. Влажность смесей в течение опыта поддерживали на уровне 70 ± 2 %. Групповой анализ субстратов проводили по методике [13].

По окончании процесса компостирования смесей на их основе получили комплексные гранулированные органоминеральные удобрения (КГУ) пролонгированного действия марки (1,5 : 1,0 : 1,5). В качестве источника азота использовали карбамид, фосфора – аммонизированный суперфосфат,

калия – хлористый калий. Сформированные гранулы разделили на три образца и сушили до постоянного веса в термостатируемом шкафу при температурах 25, 90 и 110 °С соответственно. Для оценки эффективности пролонгированного действия из полученных смесей биогумуса гранул КГУ готовили серию растворов, моделирующих вымывание водорастворимых веществ (ВРВ) в естественных условиях. В фильтрах определяли pH и оптическую плотность (D 440, D 660), а также оценивали содержание водорастворимых ГК. Общее время эксперимента составило 360 ч.

Оценку биологической активности гранул КГУ проводили на семенах кукурузы в чашках Петри с применением водного экстракта. Повторность опыта – трехкратная.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследований показали, что зольность смесей в процессе компостирования возрастала во всех вариантах опыта (табл. 1). Минимальное ее увеличение отмечено в варианте с биошломом (на 8,7 % относительно исходного значения), максимальное – в варианте с соломой (на 15,3 %). В вариантах с льнотрестой и опилками зольность увеличилась на 13,4 и 9,9 % соответственно. Потери органического вещества составили 1,5–2,8 % по отношению к исходному содержанию.

Таблица 1. Динамика влажности и зольности исходных компонентов и компостируемых смесей

Table 1. Dynamics of moisture and ash content of the original components and composted mixtures

Вариант	Влажность, %	Органическое вещество, %	Зольность, %	Объемная масса, г/л	Потери ОВ, % к исходному
<i>Исходные компоненты</i>					
Навоз КРС	80,2	69,7	30,3	–	–
Торф	42,5	92,2	7,8	–	–
Биошлом	80,8	85,3	14,7	–	–
Льнотреста	5,7	86,7	13,3	–	–
Опилки	9,1	99,7	0,3	–	–
Солома	7,3	94,5	5,5	–	–
<i>1-й отбор</i>					
Торф + навоз + биошлом	76,4	82,8	17,2	558,8	–
Торф + навоз + льнотреста	73,4	79,9	20,1	510,6	–
Торф + навоз + опилки	71,4	83,8	16,2	531,2	–
Торф + навоз + солома	72,9	82,3	17,7	289,2	–
<i>2-й отбор</i>					
Торф + навоз + биошлом	68,2	81,3	18,7	513,0	1,5
Торф + навоз + льнотреста	71,6	77,2	22,8	545,4	2,7
Торф + навоз + опилки	70,1	82,2	17,8	537,0	1,6
Торф + навоз + солома	69,5	79,5	20,4	513,2	2,8

Результаты исследований показали (рис. 1), что в процессе компостирования смесей происходит снижение содержания ВРВ в вариантах с опилками и соломой (на 15,3 и 3,9 % соответственно), а в вариантах с биошломом и льнотрестой содержание ВРВ возрастает на 18,3 и 1,8 % соответственно.

Максимальное содержание гуминовых веществ (ГВ) в начале опыта отмечено в варианте с биошломом, минимальное – в варианте с опилками. В конце опыта меньше всего ГВ было в варианте с соломой, больше всего – по-прежнему в варианте с биошломом. В процессе компостирования смесей происходило увеличение содержания ГВ во всех вариантах опыта. Так, содержание ГВ в вариантах с биошломом, льнотрестой, опилками и соломой возросло на 3,5; 11,2; 39,8 и 25,5 % соответственно (рис. 2).

В начале опыта максимальное содержание ЛГВ отмечено в варианте с биошломом, минимальное – в варианте с соломой. В конце опыта меньше всего ЛГВ было в варианте с опилками, больше всего – в варианте с соломой. Динамика содержания ЛГВ несколько отличалась от динамики ВРВ и ГВ. Так, в вариантах с льнотрестой и соломой содержание ЛГВ возросло на 7,1 и 51,3 %, а в вариантах с биошломом и опилками – снизилось на 15,8 и 15,0 % от исходного соответственно.

Следует отметить разницу в динамике процесса компостирования в варианте с соломой: в смеси с торфом произошло возрастание содержания ЛГВ в 1,5 раза, а без него – снижение, хоть и незначительное.

В начале опыта максимальное содержание трудногидролизуемых веществ (ТГВ) отмечалось в варианте с соломой, минимальное – в варианте с биошломом. В конце опыта, наоборот, меньше всего ТГВ наблюдалось в варианте с соломой, больше всего – в варианте с биошломом. В процессе компостирования смесей происходило снижение содержания ТГВ во всех вариантах опыта. Так, содержание ТГВ в вариантах с биошломом, льнотрестой, опилками и соломой снизилось на 35,0; 60,7; 58,4 и 79,9 % соответственно.

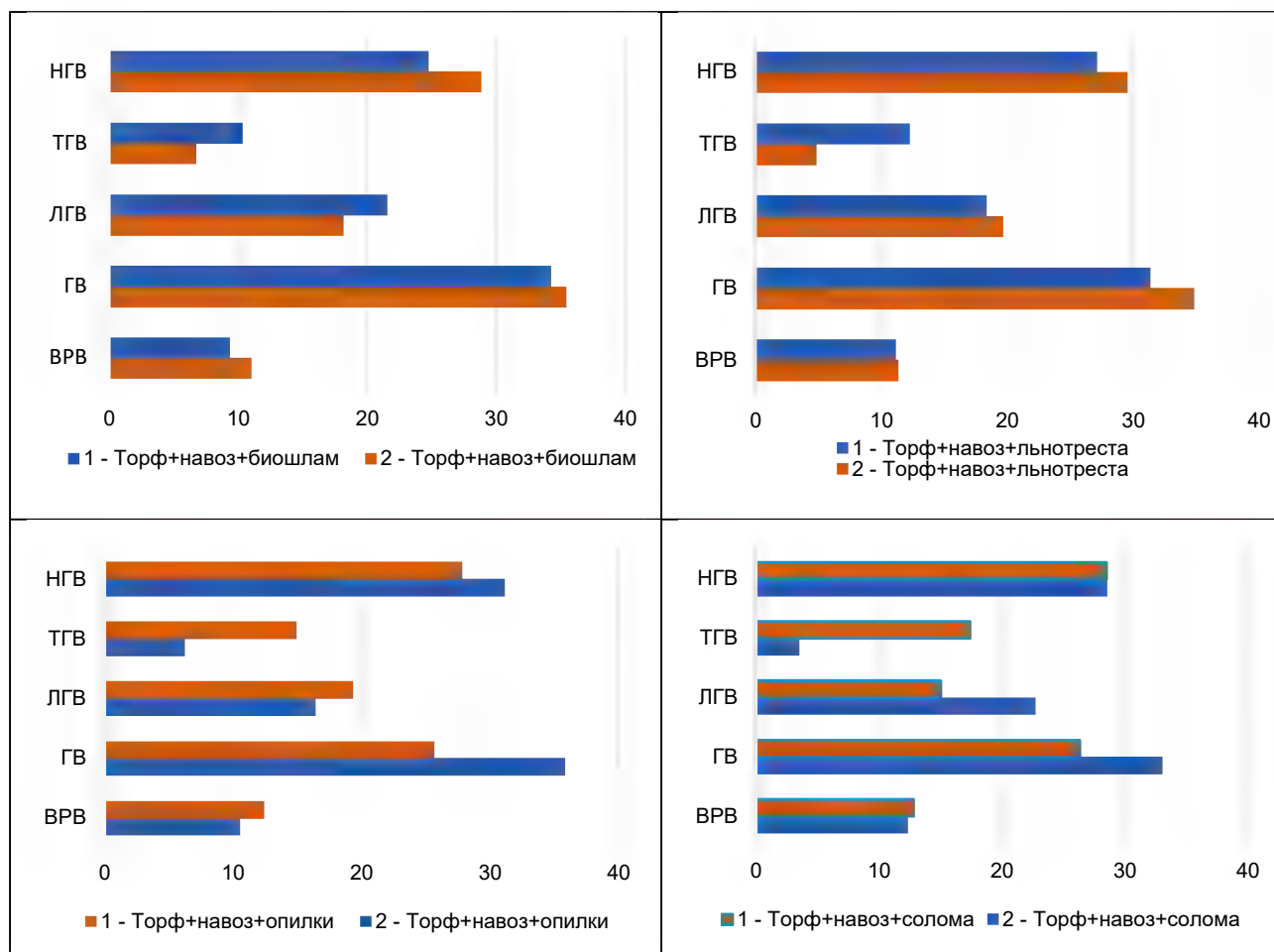


Рис. 1. Групповой состав субстратов в начале (1) и конце (2) процесса компостирования

Fig. 1. Group composition of substrates at the start (1) and finish (2) of the composting process

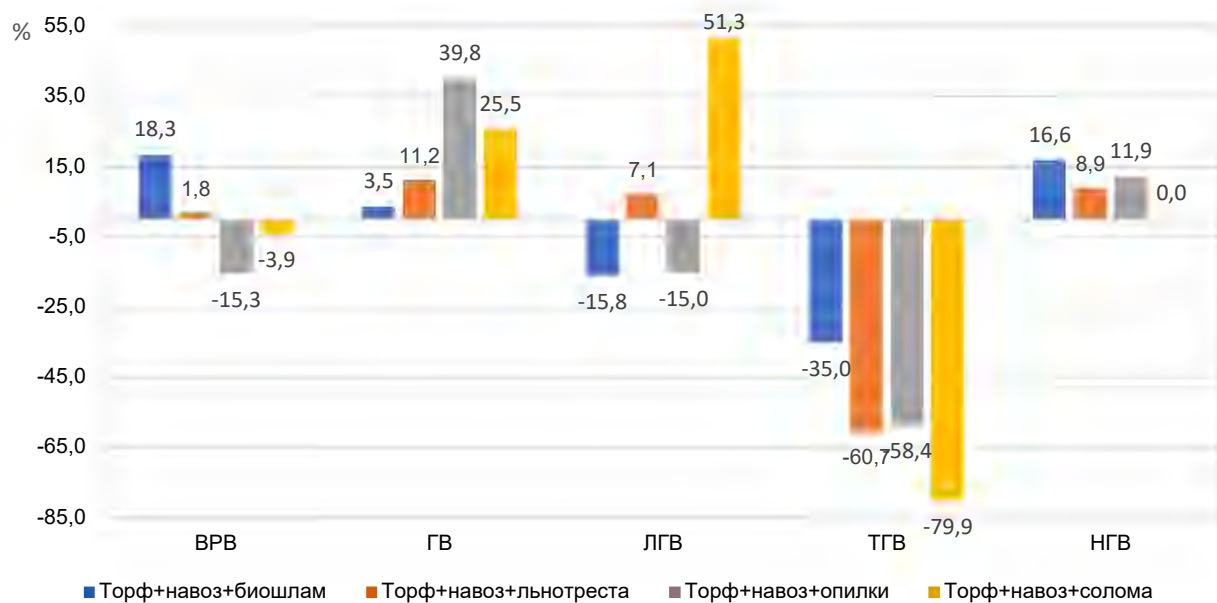


Рис. 2. Изменение группового состава субстратов в процессе компостирования

Fig. 2. Transformation in the group composition of substrates during the composting process

В начале опыта максимальное содержание негидролизующих веществ (НГВ) отмечено в варианте с соломой, минимальное – в варианте с биошломом. В конце опыта меньше всего НГВ было в варианте с соломой, больше всего – в варианте с опилками. В процессе компостирования смесей происходило увеличение содержания НГВ в вариантах с биошломом, льнотрестой и опилками (на 16,6; 8,9 и 11,9 % соответственно), а в варианте с соломой содержание НГВ осталось на том же уровне.

Таким образом, групповой состав исследуемых смесей и его динамика в течение опыта имели различия в соответствии с природой добавок. Во всех смесях происходило увеличение содержания ГВ и НГВ. Снижалось содержание ТГВ. Изменение содержания ВРВ и ЛГВ носило неоднозначный характер.

В опыте, проводившемся в аналогичных условиях с тем же сырьем, но без торфа, содержание ВРВ, ГВ и ЛГВ было значительно ниже. Это свидетельствует о том, что торф в составе смесей значительно снижает потери органического вещества в процессе компостирования [14].

Агрохимическая характеристика смесей в течение процесса компостирования приведена в табл. 2. Изменения величины pH смесей в течение эксперимента были незначительными, наблюдается снижение величины pH на 1,4–6,9 % к окончанию компостирования. В начале опыта максимальное содержание валового азота отмечено в варианте с биошломом, минимальное – в варианте с опилками. В процессе компостирования смесей происходило увеличение содержания валового азота в вариантах с льнотрестой, опилками и соломой (на 4,0; 22,7 и 16,7 % соответственно), а в варианте с биошломом – снижение на 13,8 %.

Таблица 2. Агрохимическая характеристика смесей в течение процесса компостирования

Table 2. Agrochemical characteristics of mixtures during the composting process

Вариант	pH _{KCl}	Содержание валовых форм, % на абсолютно сухое вещество		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Навоз КРС	8,3	2,0	2,5	1,4
Торф	5,4	2,8	0,5	0,02
<i>1-й отбор</i>				
Торф + навоз + биошлом	7,2	2,9	1,9	0,8
Торф + навоз + льнотреста	7,4	2,5	1,4	0,9
Торф + навоз + опилки	7,1	2,2	1,1	0,5
Торф + навоз + солома	7,1	2,4	0,9	1,2
<i>2-й отбор</i>				
Торф + навоз + биошлом	6,7	2,5	1,7	0,7
Торф + навоз + льнотреста	7,1	2,6	1,3	1,1
Торф + навоз + опилки	6,9	2,7	1,0	0,7
Торф + навоз + солома	7,0	2,8	1,2	1,3

В начале опыта максимальное содержание валового фосфора отмечено в варианте с биошломом, минимальное – в варианте с соломой. В процессе компостирования смесей происходило снижение содержания валового фосфора в вариантах с биошломом, льнотрестой и опилками в среднем на 10 %.

В начале опыта максимальное содержание валового калия отмечено в варианте с льнотрестой, минимальное – в варианте с опилками. В процессе компостирования смесей происходило увеличение содержания валового калия в вариантах с льнотрестой, опилками и соломой на 22,2; 40,0 и 8,3 % соответственно.

В табл. 3 представлены данные о влиянии состава органической части на величину pH водных экстрактов гранул КГУ, полученных на основе высокогумусированных компостов при разных температурах сушки в промывном режиме. Исследование величины pH водных экстрактов КГУ от температуры сушки показало, что повышение температуры сушки гранул на основе торфа (контроль) сопровождалось увеличением pH водных экстрактов с 4,08 до 5,58 за первые 24 ч экспозиции. Аналогичная зависимость наблюдалась и для всех приготовленных составов. Так, для гранул КГУ с компостом с биошломом pH водных экстрактов увеличивалась от 4,70 до 5,69, для компоста с льнотрестой – от 4,73 до 5,74, для компоста с опилками – от 4,95 до 5,72, для компоста с соломой – от 4,94 до 5,77. В первую очередь это связано с разложением карбамида при повышении температуры сушки с образованием гуматов аммония, которые переходят в водный раствор.

С течением времени величина pH водных экстрактов гранул КГУ увеличивалась для всех исследованных композиций. За 360 ч экспозиции величина pH водных экстрактов КГУ с компостом из биошлама составила 6,13–6,49, для компоста с льнотрестой – 6,18–6,57, для компоста с опилками – 6,28–6,75, для компоста с соломой – 6,35–6,58. Несколько ниже этот показатель был для гранул КГУ, полученных на основе торфа, и составил 5,24, 5,74, и 6,29 при увеличении температуры сушки с 25 до 90 и 110 °C соответственно.

Таблица 3. Влияние состава органической части гранул комплексных гранулированных удобрений при разных температурах сушки на величину pH водных экстрактов**Table 3. The effect influence of the composition of the organic part of granules of the complex granular fertilizers at different drying temperatures on the pH value of water extracts**

Вариант	Температура сушки, °С	pH			
		24 ч	72 ч	168 ч	360 ч
Торф + навоз + биошлам	25	4,70	5,20	5,69	6,13
	90	5,66	6,27	6,58	6,49
	110	5,69	6,15	6,33	6,35
Торф + навоз + льнотреста	25	4,73	5,24	5,72	6,18
	90	5,62	6,26	6,60	6,57
	110	5,74	6,17	6,36	6,41
Торф + навоз + опилки	25	4,95	5,43	5,86	6,28
	90	5,96	6,28	6,54	6,75
	110	5,72	6,09	6,33	6,50
Торф + навоз + солома	25	4,94	5,42	5,92	6,35
	90	5,84	6,17	6,40	6,58
	110	5,77	6,17	6,45	6,55
Контроль (торф)	25	4,08	4,58	4,89	5,24
	90	4,63	5,01	5,36	5,74
	110	5,16	5,77	6,17	6,29

Фотометрические методы широко используются для определения содержания ГВ в растворах и различных гуминовых препаратах [15–18]. В основе большинства фотометрических методов анализа лежит основной закон поглощения света (объединенный закон Бугера – Ламберта – Бера), согласно которому оптическая плотность раствора прямо пропорциональна молярному коэффициенту поглощения, концентрации поглощающего вещества и толщине слоя раствора.

Зависимость интенсивности поглощаемого света от длины волны характеризует электронный спектр поглощения рассматриваемой молекулы. Электронные спектры поглощения ГК в видимой области (400–700 нм) имеют форму экспоненты с постепенным снижением оптической плотности по мере увеличения длины волны. Согласно современным представлениям, окраска ГК обусловлена сопряженными системами с участием кислородных групп (структурными ячейками по Д. С. Орлову), изолированными друг от друга в молекулах ГК и ведущими себя независимо по отношению к электромагнитным колебаниям. В результате этого электронные спектры поглощения ГК в видимой и ультрафиолетовой областях являются суммой абсорбционных кривых изолированных участков и вследствие полидисперсности и высокомолекулярности ГК имеют сплошной характер [19]. Считается, что структурные ячейки ГК состоят из ароматических фрагментов, соединенных алифатическими мостиками, обеспечивающими полисопряжение [19, 20]. Значительную роль в структурах полисопряжения ГК играют кислородсодержащие функциональные группы (карбоксильные, карбонильные, хиноидные) [20, 21].

В работе [20] представлены результаты спектрофотометрического определения содержания ГК в угле- и торфощелочных реагентах. Коэффициент чувствительности определения ГВ в растворах угле- и торфощелочных реагентов при 440 нм выше, чем при 600–660 нм. Отношения оптических плотностей на двух длинах волн составляют $D_{440} : D_{660} = 2,95$ для ГВ из угля и $D_{440} : D_{660} = 4,94$ для растворов ГВ из торфа, что отвечает разной относительной степени конденсированности молекул ГВ.

Исследования изменения оптической плотности водных экстрактов гранул КГУ в зависимости от состава органической части, полученных при разных температурах сушки в промывном режиме, показали (табл. 4), что максимальная оптическая плотность выявлена в образцах, полученных при температуре сушки 110 °С, что свидетельствует о переходе растворимых ГВ в водный раствор. Снижение температуры сушки приводит к уменьшению оптической плотности для всех исследованных образцов в первые 24 ч наблюдения. С течением времени оптическая плотность водных растворов снижается, что может быть связано с уменьшением концентрации ГВ.

Оптическая плотность, определенная за равные промежутки времени, остается значительно выше для образцов, полученных при температурах 90 и 110 °С, чем для образцов с температурой сушки 25 °С. Увеличение оптической плотности объясняется не только возрастанием концентрации ГВ в экстракте, но и изменениями в их молекулярной структуре при нагревании, в результате которых увеличиваются системы полисопряжения в молекулах. Одним из вероятных механизмов этого может являться реакция карбонил-аминной конденсации, весьма распространенная в природных и химико-технологических процессах, в том числе при химической переработке торфа, поскольку в нем имеются карбонильные и аминогруппы, способные к активному взаимодействию. Это однако не исключает и других возможных механизмов увеличения систем полисопряжения в ГВ при нагревании КГУ. Такое явление согласуется с описанным выше эффектом возможных химических реакций с увеличением систем полисопряжения в молекулах ГВ.

Таблица 4. Влияние состава органической части на величину оптической плотности и коэффициент цветности D 440 : D 660 водных экстрактов гранул комплексных гранулированных удобрений при разных температурах сушки

Table 4. The effect of organic part composition on optical density and color coefficient D 440 : D 660 of water extracts of granules of the complex granular fertilizers at different drying temperatures

Вариант	Температура сушки, °С	D 440 (нм)				D 440 : D 660			
		24 ч	72 ч	168 ч	360 ч	24 ч	96 ч	264 ч	432 ч
Торф + навоз + биошлам	25	0,107	0,045	0,028	0,026	15,29	6,00	8,00	25,50
	90	0,745	1,060	0,441	0,084	12,31	7,97	7,47	13,92
	110	1,053	1,714	0,614	0,164	9,52	6,93	6,71	8,63
Торф + навоз + льнотреста	25	0,105	0,047	0,023	0,025	17,42	6,20	11,25	24,50
	90	0,657	1,003	0,468	0,097	13,41	8,29	7,67	12,87
	110	1,198	1,788	0,589	0,173	9,11	6,89	6,73	8,02
Торф + навоз + опилки	25	0,096	0,041	0,023	0,033	15,92	4,76	11,25	7,22
	90	1,084	0,827	0,363	0,231	9,02	7,42	7,26	7,45
	110	1,286	1,133	0,508	0,244	9,18	7,24	6,90	7,28
Торф + навоз + солома	25	0,115	0,045	0,024	0,035	14,31	4,94	11,75	7,78
	90	1,235	1,165	0,356	0,215	9,06	7,28	6,98	7,68
	110	1,395	1,328	0,548	0,240	9,18	7,23	6,93	7,73
Контроль (торф)	25	0,193	0,205	0,225	0,242	96,50	34,17	63,75	121,5
	90	0,390	0,415	0,426	0,458	18,57	8,64	9,46	91,6
	110	0,405	0,565	0,609	0,686	7,94	7,53	9,82	57,2

Известно [16], что величина оптической плотности растворов ГВ зависит как от концентрации их в растворе, так и от размера систем полисопряжения в молекулах ГВ. Величина D 440 : D 660 характеризует соотношение между поглощением в коротковолновой (440 нм) и длинноволновой (660 нм) частях спектра видимой области. Чем меньше эта величина, тем более конденсированы ГК, поскольку в числителе указана величина оптической плотности, обусловленная поглощением алифатических и ароматических несконденсированных фрагментов молекул, а в знаменателе – обусловленная поглощением конденсированных ароматических фрагментов молекул.

Результаты исследования показали (табл. 4), что за первые 24 ч настаивания отношение оптических плотностей D 440 : D 660 для всех водных экстрактов исследованных составов гранул КГУ снижалось с увеличением температуры сушки гранул. Это может свидетельствовать об увеличении систем полисопряжения в молекулах ГВ. За следующие 72 ч экспозиции отношения оптических плотностей еще снизились и колебались в диапазоне 8,29–6,00, что свидетельствует о переходе в раствор более конденсированных молекул ГВ при всех температурах сушки гранул. К 360 ч экспозиции эта тенденция сохранялась для экстрактов из образцов, полученных при температуре сушки 90–110 °С. Исключение составили образцы гранул КГУ с биошлагом, льнотрестой и торфом, полученные при температуре сушки гранул 25 °С. Величина отношения оптических плотностей растворов для них составила 25,5; 24,5 и 121,5 соответственно, что может свидетельствовать об отсутствии химических реакций, приводящих к увеличению систем полисопряжения в молекулах ГВ.

На рис. 3 представлена зависимость влияния состава и температуры сушки гранул КГУ на содержание ГК в водных экстрактах.

Показано, что максимальное содержание ГК наблюдалось в водных экстрактах варианта гранул КГУ с компостом с соломой и составило 2,39 % на сухое вещество при температуре сушки гранул 90 °С. Почти такое же содержание ГК наблюдалось в водных экстрактах варианта гранул КГУ с компостом с льнотрестой и составило 2,20 % при температуре сушки гранул 110 °С. Самые низкие значения содержания ГК отмечены в варианте с опилками. В варианте с биошлагом содержание ГК в водных экстрактах составило 1,37 и 1,85 % при температуре сушки гранул 90 и 110 °С соответственно. Следует отметить, что для всех исследованных составов КГУ, за исключением варианта с соломой, характерно увеличение содержания ГК в водных экстрактах с ростом температуры сушки гранул.

Максимальное значение энергии прорастания отмечено для вариантов с биошлагом и льнотрестой при температуре сушки гранул 25 °С (на 5,4 и 2,3 % выше контроля соответственно), а для вариантов с опилками и соломой – при температуре сушки 110 °С. Причем в варианте с опилками энергия прорастания составила 97,0 % к контролю, а в варианте с соломой – 108,4 %.

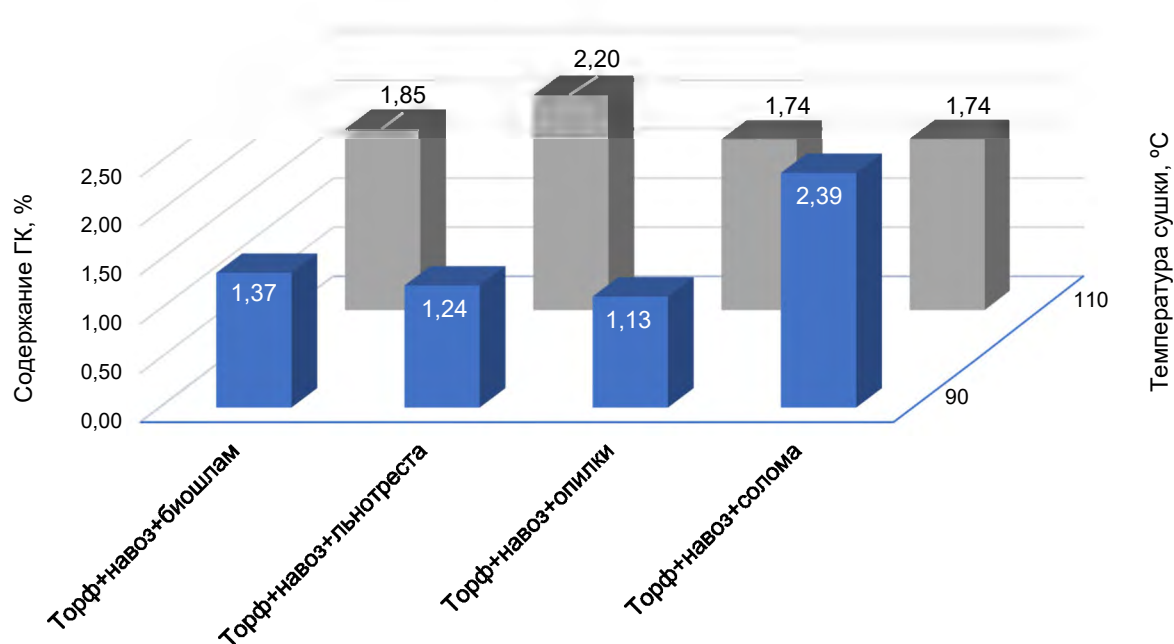


Рис. 3. Влияние состава органической части и температуры сушки гранул комплексных гранулированных удобрений на содержание гуминовых кислот в водных экстрактах

Fig. 3. Effect of the composition of the organic part and the drying temperature of granules of the complex granular fertilizers on the humic acid content in water extracts

Стопроцентная всхожесть отмечена в вариантах с биошлагом и соломой при температуре сушки гранул 25 °C, в варианте с опилками – 110 °C, а в варианте с льнотрестой – 90 °C.

Таким образом, введение в состав компостируемой торфонавозной смеси 20 % биошлага биогазовых установок не ухудшило агрофизические и агрохимические свойства полученных из них гранул КГУ, а также не оказало негативного влияния на их биологическую (ростстимулирующую) активность.

Закключение. Проведенные исследования показали, что в процессе ферментации смесей торфа и бесподстилочного навоза КРС с биошлагом биогазовых установок, соломой, опилками и льнотрестой происходит трансформация органического вещества с получением биогумуса на основе вторичного сырья, применимого для производства гранулированных органоминеральных удобрений.

Показано, что групповой состав исследуемых смесей изменяется с увеличением содержания ГВ на 3,5–39,8 % и снижением содержания ТГВ на 35,0–79,9 % для всех исследованных композиций по сравнению с исходным. В процессе компостирования смесей происходит снижение содержания ВРВ в вариантах с опилками и соломой на 15,3 и 3,9 % соответственно, а в вариантах с биошлагом и льнотрестой содержание ВРВ возрастает на 18,3 и 1,8 % соответственно.

Отмечено, что рост температуры сушки от 25 до 110 °C гранул на основе компостов для всех приготовленных составов сопровождается увеличением pH водных экстрактов с 4,08 до 5,77 за первые 24 ч экспозиции, что связано в первую очередь с разложением карбамида и образованием гуматов аммония. При этом также возрастают значения оптической плотности экстрактов – с 0,096 до 1,395, и снижается коэффициент цветности – с 15,92 до 9,02, что свидетельствует не только об образовании ВГВ и возрастании их концентраций в экстракте, но и об изменениях в их молекулярной структуре при нагревании, в результате которых увеличиваются системы полисопряжения в молекулах.

Для всех исследованных составов КГУ, за исключением варианта с соломой, характерно увеличение содержания ГК в водных экстрактах с ростом температуры сушки гранул. Максимальное содержание ГК наблюдается в водных экстрактах гранул КГУ с компостом с соломой и достигает 2,39 % на сухое вещество. Самые низкие значения содержания ГК отмечены в варианте с опилками. В варианте с биошлагом содержание ГК в водных экстрактах составило 1,37 и 1,85 % при температуре сушки гранул 90 и 110 °C соответственно, что позволяет рекомендовать полученные биокомпосты на основе отходов для получения гранулированных органоминеральных удобрений.

Список использованных источников

1. Белюченко, И. С. Трофические аспекты формирования сложного компоста / И. С. Белюченко // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 94(10). – С. 1–27.
2. Белюченко, И. С. Сложный компост и его роль в улучшении почв / И. С. Белюченко // Экологический вестник Северного Кавказа. – 2012. – Т. 8, № 2. – С. 75–86.
3. Белюченко, И. С. К вопросу о механизмах управления развитием сложных компостов / И. С. Белюченко // Экологический вестник Северного Кавказа. – 2012. – Т. 8, № 3. – С. 88–111.
4. Белюченко, И. С. Применение органических и минеральных отходов для подготовки сложных компостов с целью повышения плодородия почв / И. С. Белюченко // Труды КубГАУ. – 2012. – Т. 1, № 39. – С. 63–68.
5. Получение биогаза из смесей биотходов / Р. К. Нагорный, А. И. Лембович, Д. В. Шмыга, Н. А. Ванькевич // Биотехнологии микроорганизмов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27–29 нояб. 2019 г. – Минск : БГУ, 2019. – С. 136–139.
6. Яковчик С. Г. Опыт Беларуси по переработке навоза животных и помета птиц с использованием биогазовых технологий / С. Г. Яковчик, Н. Ф. Капустин // Экологически дружественное сельское и лесное хозяйство для будущих поколений : сб. науч. трудов Междунар. науч. конф. XXXVI CIOSTA CIGR V, Санкт-Петербург, 2015 г. / СПб. : Гос. агр. ун-т. – СПб., 2015. – С. 311–313.
7. Бахов, Ж. К. Рациональные решения биотехнологической переработки сельскохозяйственных отходов / Ж. К. Бахов, Б. Ж. Муталиева, К. У. Коразбекова // Биотехнология. Взгляд в будущее : материалы II Междунар. науч. интернет-конф., Казань, 26–27 марта 2013 г. – Казань, 2013. – С. 16–19.
8. Иовик, Л. Н. Использование сброженного отхода биогазовой установки в качестве органического удобрения (аналитический обзор) / Л. Н. Иовик // Почвоведение и агрохимия. – 2015. – № 1 (54). – С. 230–237.
9. В РЭО заявили, что компостирование снизит объемы захоронения отходов на 11 млн тонн в год. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/16315411> (дата обращения: 19.12.2024).
10. Плышевский, С. В. Аэробное компостирование: теоретические основы / С. В. Плышевский, А. Л. Ковш // Экология на предприятии. – 2021. – № 6. – С. 76–88.
11. Белюченко, И. С. Влияние сложного компоста на физические свойства почвенного покрова / И. С. Белюченко // Научный журнал КубГАУ. – 2014. – № 95. – С. 275–294.
12. Волин, К. С. Технология получения комплексных гранулированных гуматных удобрений и эффективность их применения / К. С. Волин, С. И. Жеребцов, И. П. Исмаилов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 6. – С. 24–35.
13. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
14. Научное обоснование методов получения экологически безопасных удобрений на основе органического сырья и способов эколого-экономического использования выбывших из промышленной эксплуатации торфяных месторождений до и после повторного заболачивания : отчет о НИР (заключ.) / НАН Беларуси, Ин-т природопользования ; рук. В. А. Ракович. – Минск, 2020. – 262 с. – № ГР 20181095.
15. Орлов, Д. С. Практикум по биохимии гумуса / Д. С. Орлов, Л. А. Гришина, Н. Л. Ерошичева. – М. : МГУ, 1969. – 156 с.
16. Физико-химические свойства гуминовых веществ торфа и бурого угля / Л. Г. Сивакова, Н. П. Лесникова, Н. М. Ким, Г. М. Ротова // Химия твердого топлива. – 2011. – № 1. – С. 3–8.
17. Жданова, А. В. Изучение структурных компонентов и физико-химических свойств гуминовых веществ низкоминерализованных иловых сульфидных грязей как источника антиоксидантных лекарственных средств : автореф. дис. ... канд. фарм. наук / Жданова Алина Валитовна. – Самара, 2011. – 24 с.
18. Проницаемость в ряду гумусовых кислот пелоидов / М. А. Кривопалова, Н. П. Аввакумова, М. Н. Глубокова, А. В. Жданова // Гуминовые вещества в биосфере : труды IV Всерос. конф. – СПб, 2007. – С. 51–54.
19. Булатов, М. И. Практическое руководство по фотометрическим методам анализа / М. И. Булатов, И. П. Калинин. – Л. : Химия, 1986. – 432 с.
20. Изучение систем полисопряжения гуминовых кислот торфа по генетическим рядам гумификации / В. П. Стригуцкий, Н. Н. Бамбалов, В. В. Марыганова, Л. Ю. Тычинская // Гуминовые вещества в биосфере : труды II Междунар. конф. – М., 2004. – С. 108–111.
21. Орлов, Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации / Д. С. Орлов. – М. : Изд-во МГУ, 1990. – 324 с.

References

1. Belyuchenko I. S. *Troficheskie aspekty formirovaniya slozhnogo komposta* [Trophic aspects of complex compost formation]. *Nauchnyj zhurnal KubGAU = Scientific journal of KubSAU*, 2013, no. 94(10), pp. 1–27. (in Russian)
2. Belyuchenko I. S. *Slozhnyj kompost i ego rol' v uluchshenii pochv* [Complex compost and its role in soil improvement]. *Ekologicheskij vestnik Severnogo Kavkaza = Ecological Bulletin of the North Caucasus*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 75–86. (in Russian)
3. Belyuchenko I. S. *K voprosu o mekhanizmah upravleniya razvitiem slozhnykh kompostov* [On the issue of mechanisms for managing the development of complex composts]. *Ekologicheskij vestnik Severnogo Kavkaza = Ecological Bulletin of the North Caucasus*, 2012, vol. 8, no. 3, pp. 88–111. (in Russian)

4. Belyuchenko I. S. *Primenenie organicheskikh i mineral'nykh othodov dlya podgotovki slozhnykh kompostov s cel'yu povysheniya plodorodiyi pochv* [Use of organic and mineral waste for the preparation of complex composts in order to increase soil fertility]. *Trudy KubGAU = Papers KubSAU*, 2012, vol. 1, no. 39. pp. 63–68. (in Russian)
5. Nagorny R. K., Lembovich A. I., Shmyga D. V., Vankevich N. A. *Poluchenie biogaza iz smesey bioothodov* [Obtaining biogas from mixtures of biowaste]. *Biotehnologii mikroorganizmov. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Biotechnology of microorganisms. Proceedings of the International scientific and practical conference]. Minsk, BSU Publ., 2019, pp. 136–139. (in Russian)
6. Yakovchik S. G., Kapustin N. F. *Opyt Belarusi po pererabotke navoza zhivotnykh i pometa ptic s ispol'zovaniem biogazovykh tekhnologij* [Experience of Belarus in processing animal manure and bird droppings using biogas technologies]. *Ekologicheskii druzhestvennoe sel'skoe i lesnoe hozyajstvo dlya budushchih pokolenij. Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii XXXVI CIOSTA CIGR V* [Proc. of Int. sci. conf. XXXVI CIOSTA CIGR V "Environmentally friendly agriculture and forestry for future generations"]. St. Petersburg, State Agrarian University, 2015, pp. 311–313. (in Russian)
7. Bakhov Zh. K., Mutaliev B. Zh., Korazbekova K. U. *Racional'nye resheniya biotekhnologicheskoy pererabotki sel'skohozyajstvennykh othodov* [Rational solutions for biotechnological processing of agricultural waste]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchnoj internet-konferencii «Biotehnologiya. Vzglyad v budushchee»* [Proc. of II Int. scien. internet-conf. "Biotechnology. A Look into the Future"]. Kazan, 2013, pp. 16–19. (in Russian)
8. Iovik L. N. *Ispol'zovanie sbrozhennogo othoda biogazovoj ustanovki v kachestve organicheskogo udobreniya (analiticheskij obzor)* [Use of fermented waste from a biogas plant as an organic fertilizer (analytical review)]. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2015, no. 1 (54), pp. 230–237. (in Russian)
9. *V REO zayavili, chto kompostirovanie snizit ob'em y zahoroneniya othodov na 11 mln tonn v* [REO stated that composting will reduce waste disposal volumes by 11 million tons per year]. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/16315411> (accessed 19 December 2024).
10. Plyshevsky S. V., Kovsh A. L. *Aerobnoe kompostirovanie: teoreticheskie osnovy* [Aerobic composting. Theoretical foundations]. *Ekologiya na predpriyatii = Ecology at the enterprise*, 2021, no. 6. pp. 76–88. (in Russian)
11. Belyuchenko I. S. *Vliyaniye slozhnogo komposta na fizicheskie svoystva pochvennogo pokrova* [Effect of complex compost on the physical properties of the soil cover]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific journal of KubSAU*, 2014, no. 95, pp. 275–294. (in Russian)
12. Volin K. S., Zherebtsov S. I., Ismailov I. P. *Tekhnologiya polucheniya kompleksnykh granulirovannykh gumatnykh udobrenij i effektivnost' ih primeneniya* [Technology of obtaining complex granulated humate fertilizers and the efficiency of their application]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2016, no. 6, pp. 24–35. (in Russian)
13. Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ih opredeleniya* [Basic properties of peat and methods of their determination]. *Nauka i tekhnika = Science and Technology*, Minsk, 1975, pp. 320. (in Russian)
14. *Nauchnoe obosnovanie metodov polucheniya ekologicheskii bezopasnykh udobrenij na osnove organicheskogo syr'ya i sposobov ekologo-ekonomicheskogo ispol'zovaniya vybyvshih iz promysh-lennoj ekspluatatsii torfyanykh mestorozhdenij do i posle povtornogo zabolachivaniya. Otchet o NIR (zaklyuchitel'nyy)* [Scientific substantiation of methods for obtaining environmentally friendly fertilizers based on organic raw materials and methods of ecological and economic use of peat deposits withdrawn from industrial exploitation before and after re-wetting. Research report (final)]. Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, supervisor V. A. Rakovich. Minsk, 2020, p. 262, St. Reg. no. 20181095. (in Russian)
15. Orlov D. S., Grishina L. A., Eroshicheva N. L. *Praktikum po biohimii gumusa* [Workshop on the biochemistry of humus]. Moscow, MSU, 1969. p. 156. (in Russian)
16. Sivakova L. G., Lesnikova N. P., Kim N. M., Rotova G. M. *Fiziko-himicheskie svoystva guminovykh veshchestv torfa i burogo uglya* [Physico-chemical properties of humic substances of peat and brown coal]. *Himiya tverdogo topliva = Solid Fuel Chemistry*, 2011, no. 1, pp. 3–8. (in Russian)
17. Zhdanova A. V. *Izuchenie strukturnykh komponentov i fiziko-himicheskikh svoystv guminovykh veshchestv nizkomineralizovannykh ilovykh sulfidnykh gryazej kak istochnika antioksidantnykh lekarstvennykh sredstv* [Study of structural components and physicochemical properties of humic substances of low-mineralized sulfide silt muds as a source of antioxidant drugs]. *Avtoreferat dissertatsii kandidata farmaceuticheskikh nauk* [Abstract of the diss. of a cand. of pharmaceutical sci.]. Samara, 2011, p. 24. (in Russian)
18. Krivopalova M. A., Avvakumova N. P., Glubokova M. N., Zhdanova A. V. *Pronicaemost' v ryadu gumusovykh kislot peloidov* [Permeability in the series of humic acids of peloids]. *Guminovye veshchestva v biosphere. Trudy IV Vserossiyskoy konferencii* [Proc. of the IV All-Russian conf. "Humic substances in the biosphere"]. St. Petersburg, 2007, pp. 51–54. (in Russian)
19. Bulatov M. I., Kalinkin I. P. *Prakticheskoe rukovodstvo po fotometricheskimi metodami analiza* [Practical guide to photometric methods of analysis]. Leningrad, Chemistry, 1986, p. 432. (in Russian)
20. Strigutsky V. P., Bambalov N. N., Maryganova V. V., Tychinskaya L. Yu. *Izuchenie sistem polisopryazheniya guminovykh kislot torfa po geneticheskimi ryadami gumifikatsii* [Study of polyconjugation systems of peat humic acids according to genetic series of humification]. *Guminovye veshchestva v biosphere. Trudy II Mezhdunarodnoj konferencii* [Proc. of the 2nd Int. conf. "Humic substances in the biosphere"]. Moscow, 2004, pp. 108–111. (in Russian)
21. Orlov D. S. *Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii* [Humic acids of soils and the general theory of humification]. Moscow, Moscow State University Publ. House, 1990, p. 324. (in Russian)

Информация об авторах

Сосновская Наталия Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: natalisosnov@mail.ru

Ракович Вячеслав Александрович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией биогеохимии и агроэкологии, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: mire4@tut.by

Красноберская Ольга Георгиевна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: olgakrasnoberskaya@gmail.com

Добринец Елена Алексеевна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kim_re_na@mail.ru

Information about the authors

Natalia E. Sosnovskaya – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Associate Professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus. E-mail: natalisosnov@mail.ru

Vyacheslav A. Rakovich – Ph. D. (Technical), Head of Lab. of Biogeochemistry and Agroecology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus. E-mail: mire4@tut.by

Olga G. Krasnobreskaya – Ph. D. (Agricultural), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: olgakrasnoberskaya@gmail.com

Elena A. Dobrinets – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus. E-mail: kim_re_na@mail.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-180-189>
УДК 662.7:547-38/54-386+636.028:619

Поступила в редакцию 31.03.2025
Received 25.03.2025

УДОБРЕНИЕ НА ОСНОВЕ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ С МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ

Н. А. Жмакова¹, М. Ф. Степура², Н. Л. Макарова¹, П. В. Пась², Т. В. Матюк²

¹Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

²Научно-практический центр НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству,
аг. Самохваловичи, Минский район, Минская область, Беларусь

Аннотация. Применение комплексных жидких удобрений, в том числе с микроэлементами и биологически активными добавками, является современным агрохимическим приемом и важным фактором повышения урожайности, улучшения качества сельскохозяйственной продукции. Авторами разработана технология получения жидкого гуматсодержащего удобрения «Тезоро» путем введения в гуминовый препарат соединений азота, калия и микроэлементов, имеющих важное биологическое значение для растений. Исследование химического состава удобрения показало наличие в его составе, кроме питательных элементов, биологически активных соединений, в том числе гуминовых веществ, низкомолекулярных органических кислот, фенолкарбоновых кислот, обладающих ростстимулирующими свойствами, и широкого спектра макро- и микроэлементов, многие из которых необходимы растениям для роста, развития и повышения продуктивности. Агрохимические испытания нового удобрения «Тезоро» показали, что его использование при выращивании томата, огурца и зеленных культур в открытом и защищенном грунте способствовало улучшению морфометрических параметров растений, увеличению урожайности, росту товарности плодов и снижению нитратонакопления в овощной продукции по сравнению с контролем и эталоном – жидким удобрением «Гумирост».

Ключевые слова: удобрение; гуминовые вещества; микроэлементы; химический состав; агрохимические испытания; овощные культуры; урожайность; качество.

Для цитирования. Жмакова Н. А., Степура М. Ф., Макарова Н. Л., Пась П. В., Матюк Т. В. Удобрение на основе гуминовых кислот с микроэлементами // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 180–189.

FERTILIZER BASED ON HUMIC ACIDS WITH MICROELEMENTS

N. A. Zhmakova¹, M. F. Stepuro², N. L. Makarova¹, P. V. Pas², T. V. Matyuk²

¹Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

²Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for potato and fruit and vegetable growing, Samokhvalovichy agricult. vil., Minsk district, Minsk region, Belarus

Annotation. The use of complex liquid fertilizers, including those with microelements and biologically active additives, is a modern agrochemical technique and an important factor in increasing yields, improving the quality and microelement composition of agricultural products. The authors have developed a technology of liquid humate-containing fertilizer “Tesoro” obtaining by introducing nitrogen, potassium and microelements compounds of important biological significance for plants into humic preparation. The study of the chemical composition of the fertilizer showed the presence in its composition, in addition to nutrients, biologically active compounds, including humic substances, low-molecular organic acids, phenolcarboxylic acids with growth-stimulating properties, and a wide range of macro- and microelements, many of which are necessary for growth, development and increased productivity of plants. Agrochemical tests of new “Tesoro” fertilizer showed that its use in tomato, cucumber and green crops cultivation in open and protected soil contributed to morphometric parameters of plants improvement, increase in yield, the growth of fruit marketability and the reduction of nitrate accumulation in vegetable products compared to control and reference – Gumirost liquid fertilizer.

Keywords: fertilizer; humic substances; microelements; chemical composition; agrochemical tests; vegetable crops; yield; quality.

For citation. Zhmakova N. A., Stepuro M. F., Makarova N. L., Pas P. V., Matyuk T. V. Fertilizer based on humic acids with microelements. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 180–189.

Введение. В системе агрохимических приемов по повышению урожайности и накоплению биохимических элементов в продукции овощных культур наиболее существенным является применение удобрений с микроэлементами. Недостаточное содержание их подвижных форм в почве зачастую является фактором, лимитирующим формирование урожая и показатели качества овощной продукции. Это обусловлено снижением запасов подвижных форм многих микроэлементов в большинстве почв (особенно легкого гранулометрического состава), что связано с их отрицательным балансом в последние годы и снижением доступности многих элементов питания для растений. Устранение дефицита микроэлементов, многие из которых необходимы растениям и выполняют различные физиологические функции, служит для профилактики некоторых эндемических заболеваний растений, человека и животных. Применение удобрений с микроэлементами в период вегетации растений является важным фактором улучшения микроэлементного состава овощной продукции.

В настоящее время в растениеводстве все шире используются жидкие удобрения, которые наряду с основными элементами питания содержат микроэлементы и биологически активные регуляторы роста растений. Высокая эффективность некорневых обработок растений такими удобрениями связана с тем, что весь комплекс веществ, необходимый для роста растений, вносится в один прием, легко усваивается растением напрямую, через поверхность листа, действует быстро и эффективно, что позволяет избежать значительных потерь, которые неизбежны при внесении удобрений в почву. При этом можно строго дифференцировать питание растений в разные фазы вегетации, что положительно сказывается на их росте и развитии, повышении урожайности и качестве продукции [1, 2].

В связи с этим актуальной задачей является разработка жидких удобрений, включающих наряду с основными элементами питания необходимые растениям подвижные формы микроэлементов и биологически активные соединения рострегулирующего действия.

Наиболее целесообразно одновременное внесение минеральных удобрений и микроэлементов с регуляторами роста растений гуминовой природы, так как при этом растение обеспечивается питательными веществами, биогенными микроэлементами, а наличие гуминового препарата способствует более полному и эффективному их усвоению. Многолетними исследованиями убедительно доказано, что под влиянием низких концентраций (0,01–0,001 %) гуминовых кислот в растениях активизируются основные звенья обмена веществ: синтез белка, нуклеиновых кислот, пигментов, фосфорсодержащих соединений – переносчиков энергии. Гуминовые кислоты оказывают существенное влияние на ферментативную деятельность растительной клетки, фотохимические процессы, транспорт электронов и фосфорилирование в хлоропластах. Все это способствует повышению урожая и улучшению качества продукции [3, 4].

Немаловажным фактором является также стабилизирующая роль гуматсодержащих добавок в составе жидких удобрений, один из недостатков которых – неустойчивость питательных солей в растворах и выпадение их в осадок. Гуминовые вещества являются высокомолекулярными коллоидными системами со свойствами полиэлектролитов, имеющих большую обменную емкость, и способны удерживать в растворе минеральные компоненты удобрения, регулировать их поступление в растения.

В настоящее время одним из наиболее распространенных способов использования гуматсодержащих удобрений с микроэлементами являются некорневые подкормки сельскохозяйственных культур в период их вегетации. Достоинствами такого приема являются возможность улучшения микроэлементного питания растений в период наибольшей их потребности и экономия дорогостоящих и дефицитных препаратов микроэлементов.

Цель работы – разработать жидкое гуматсодержащее удобрение с микроэлементами «Тезоро» и провести его регистрационные испытания на ряде овощных культур.

Материалы и методы исследований. При исследовании физико-химических свойств цвет удобрения «Тезоро» оценивали визуально, запах – органолептически, плотность измеряли ареометром, реакцию среды – при помощи иономера И-120.1, оптическую плотность 0,01%-ных растворов определяли на спектрофотометре СпекордUV-vis при длине волны 465 нм.

Метод определения массовой доли минеральных веществ (зола) заключался в полном сжигании навески высушенного образца удобрения в муфельной печи при температуре 650–700 °С и прокаливании зольного остатка до постоянной массы при той же температуре. Массовую долю зола определяли по процентному соотношению массы остатка, образующегося при прокаливании, к общей массе взятого образца. Массовую долю органических веществ удобрения – как разность сухих веществ и зола.

Гуминовые кислоты выделяли осаждением путем подкисления 10%-ной соляной кислотой до pH 2,0. Осадок выдерживали в морозильной камере при температуре –5 °С в течение 2 сут. Затем размораживали, фильтровали на взвешенные фильтры, отмывали дистиллированной водой до исчезновения ионов хлора в промывных водах, сушили при температуре 80 °С до постоянной массы и определяли содержание гуминовых кислот весовым методом.

Выделение фракции свободных фенольных соединений проводили путем экстракции 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. В результате реакции развивалось 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 [5].

Общее содержание карбоновых кислот определяли в пересчете на янтарную в растворе, прошедшем через колонку КУ-1, титрованием 0,05 *н.* раствора NaOH.

Определение фенолкарбоновых кислот проводили по методу [6].

Содержания общего азота определяли по методу Кьельдаля согласно ГОСТ 26715-85.

Для исследования минерального состава гуминового удобрения «Тезоро» использовали сухое вещество, полученное путем упаривания и высушивания до полного удаления влаги, а также золу после его сжигания при температуре 650–700 °С. Исследования проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа на анализаторе СЕР-01(ELVA-X).

При изучении действия гуматсодержащего удобрения «Тезоро» на рост и развитие растений овощных и зеленных культур закладку опытов проводили согласно методическим рекомендациям [7, 8].

В качестве эталонного использовали гуматсодержащее удобрение Гумирост, имеющее следующий состав: гуминовые вещества – 100 г/л, азот – 5,55 г/л; фосфор – 0,72 %, калий – 5,12 %; магний – 334 мг/л, цинк – 8,0, железо – 185, марганец – 9,5, медь – 4,75, кальций – 918, бор – 23 мг/л. Состав образца гуматсодержащего жидкого удобрения с микроэлементами «Тезоро»: гуминовые кислоты – 40 г/л; калий – 18,3; азот – 168,5; бор – 1,28 молибден – 0,12; йод – 0,17 г/л. Контрольный вариант – обработка водой.

Полевые опыты проводили на опытном участке РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству» (далее – РУП НПЦ НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству) в аг. Самохваловичи Минского района. Почва – дерново-подзолистая легкосуглинистая, с содержанием гумуса 2,09 %, P₂O₅ – 184 мг/кг, K₂O – 212 мг/кг, рН_{KCl} 5,8. Повторность опытов – четырехкратная. Размер учетных делянок – 28 м². Объектами исследований являлись томат сорта Вежа и огурец-гибрид сорта Кураж F₁ в защищенном грунте, томат сорта Раница и огурец сорта Верасень в открытом грунте, салат кочанный сорта Ларанд, петрушка сорта Гиганте де Италия, кориандр сорта Душистый.

Оптимальные дозы внесения удобрения «Тезоро» установлены в зависимости от потребности элементов питания салата, петрушки и кориандра и многооборотовых овощных культур – огурца и томата, выращиваемых на дерново-подзолистых почвах, и составили для томата открытого грунта – 2,4 л/га, защищенного – 2,6; огурца открытого грунта – 2,1, защищенного – 2,2; салата – 1,2; петрушки – 1,4; кориандра – 1,3 л/га. Дозы внесения эталонного удобрения «Гумирост»: томаты открытого грунта – 2,6 л/га, защищенного – 2,8; огурец открытого и защищенного грунта – 2,4; салат – 1,5; петрушка – 1,7; кориандр – 1,6 л/га. Расход рабочего раствора – 300 л/га. Некорневые подкормки проведены через 7 дней после высадки рассады в грунт и в фазу бутонизации.

Наблюдения и учеты проведены согласно работам Б. А. Доспехова «Методика полевого опыта» [7] и В. Ф. Белика «Методика полевого опыта в овощеводстве и бахчеводстве» [8]. Полученные в результате проведения исследований данные подвергнуты статистической обработке дисперсионным методом по Б. А. Доспехову с использованием программы Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. Институтот природопользования НАН Беларуси совместно с РУП НПЦ НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству разработана технология получения удобрения на основе гуминовых кислот «Тезоро», которая заключается в получении жидкого гуминового препарата методом химической деструкции торфа при повышенных температуре и давлении с последующим введением в раствор соединений азота, калия и микроэлементов бора, молибдена и йода. Эти микроэлементы имеют важное биологическое значение при выращивании овощных культур. Так, основной физиологической функцией бора является участие в углеводном и белковом обмене, при его недостатке снижается содержание сахаров в овощной продукции. Бор способствует более раннему формированию урожая, его дефицит сказывается в первую очередь на молодых растениях, рост которых сильно замедляется. Молибден играет большую роль в азотном обмене растений, при его нехватке нарушается и прекращается образование хлорофилла. Йод – жизненно важный элемент, недостаток которого наблюдается в почвах Беларуси и, следовательно, в получаемой продукции, поэтому его введение в состав удобрений является важной практической задачей. В гуматсодержащем удобрении летучие соединения йода связываются гуминовым комплексом, и он вполне доступен растениям. Кроме того, присутствие йода в удобрении повышает устойчивость растений к грибным и бактериальным болезням.

Установлена физико-химическая характеристика гуматсодержащего удобрения «Тезоро». Образец удобрения охарактеризован по ряду показателей: массовой доле сухих веществ, массовой доле органических веществ, зольности, активной кислотности и др. (табл. 1).

Таблица 1. Физико-химическая характеристика жидкого удобрения на основе гуминовых кислот «Тезоро»

Table 1. Physico-chemical characteristics of liquid fertilizer based on humic acids 'Tesoro'

Цвет	Запах	Оптическая плотность	Массовая доля веществ, %		Плотность, г/см ³	pH
			органических	сухих		
Темно-коричневый	Щелочи и аммиака	0,65	40,60	44,04	1,14	9,95

Удобрение «Тезоро» представляет собой однородную, хорошо растворимую в воде непрозрачную жидкость темно-коричневого цвета с плотностью 1,14 г/см³ и pH 9,95. В составе удобрения содержится 43,3 % сухих и 40,6 % органических веществ. Содержание механических примесей составляет 0,1 %.

Выполнена химическая характеристика образца гуминового препарата, на основе которого получают удобрение «Тезоро» путем введения в его состав карбамида, микроэлементов и самого жидкого удобрения (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав гуминового препарата и жидкого удобрения на основе гуминовых кислот «Тезоро»

Table 2. Chemical composition of humic preparation and liquid fertilizer based on humic acids 'Tesoro'

Компоненты	Содержание			
	в гуминовом препарате		в удобрении	
	г/л	% на ОВ	г/л	% на ОВ
Органические вещества, в том числе:	88,0	100,0	406,00	100,0
гуминовые кислоты	63,4	72,1	44,70	11,01
карбоновые кислоты	14,3	16,3	10,09	2,49
фенольные соединения	3,4	3,9	2,40	0,59
фенолкарбоновые кислоты	2,3	2,6	1,60	0,39
карбамид	—	—	335,81	82,71
Минеральные вещества, в том числе:	27,0	—	34,36	—
общий азот	22,1	—	170,42	—
калий	—	—	15,23	—
бор	—	—	1,20	—
молибден	—	—	0,12	—
йод	—	—	0,16	—

Преобладающим компонентом гуминового препарата являются гуминовые вещества, содержание которых составляет 72,1 % в расчете на его органическую массу. Содержание карбоновых кислот – около 16,0 %, фенольных соединений – 3,9, в том числе фенолкарбоновых кислот – 2,6 %.

Основным биологически активным компонентом гуматсодержащего удобрения также являются гуминовые кислоты, концентрация которых достигает 44,70 г/л, или 11,01 %. Массовая доля низкомолекулярных карбоновых кислот составляет 10,09 г/л, фенолкарбоновых – 1,60 г/л. Удобрение обогащено азотом за счет введенного карбамида (335,81 г/л), содержание азота в растворе – 170,42 г/л.

Массовая доля гуминовых кислот, как и других биологически активных компонентов, в удобрении значительно снижается в сравнении с исходным гуминовым препаратом в связи с введением в его состав значительных количеств питательных добавок. Однако присутствие в жидком азотно-калийном удобрении биологически активных веществ торфа положительно воздействует на обменные процессы и иммунитет растений.

Экспериментальные данные по определению химического состава макро- и микроэлементов в сухом веществе и золе удобрения «Тезоро» представлены в табл. 3.

В наибольшем количестве в золе и сухом веществе гуминового удобрения представлен калий, доля которого составляет 64,18 % в зольном остатке и 31,23 % в сухом веществе. В значительных количествах присутствуют также железо, содержание которого в зольной части составляет 6,26 %, алюминий – 5,12, кремний – 6,37, кальций – 4,61 %. Магний в золе содержится в размере 2,65 %, фосфор – 2,16, натрий – менее 1 %.

Аналогичная закономерность снижения содержания макроэлементов наблюдается в сухом веществе от калия, кремния и железа к кальцию и алюминию и далее к магнию, фосфору и натрию. В целом основными макроэлементами представлено более 92 % зольной части гуминового удобрения. В основном макроэлементы привнесены зольными составляющими самого торфа, и лишь высокое содержание калия в сухом веществе и, соответственно, зольном остатке обусловлено применением калиевой щелочи как реагента в технологическом процессе.

Таблица 3. Содержание основных макро- и микроэлементов в сухом веществе и золе удобрения

Table 3. Content of main macro- and microelements in dry matter and ash of fertilizer

Элемент	Массовая доля в сухом веществе		Массовая доля в золе	
	мкг/г	%	мкг/г	%
<i>Макроэлементы</i>				
Si	41 173,2834	4,12	63 721,0114	6,37
Al	20 126,1489	2,01	51 246,2167	5,12
Mg	10 124,2110	1,01	26 480,3718	2,65
K	312 316,7812	31,23	641 786,0012	64,18
P	9891,3971	0,99	21 608,3154	2,16
Ca	20 653,3871	2,07	46 078,6100	4,61
Fe	32 858,9216	3,29	62 551,6512	6,26
Na	875,2060	0,09	8124,6850	0,81
<i>Микроэлементы</i>				
Ti	1208,8110	0,1209	2699,9500	0,2690
Cr	107,9500	0,0108	188,9058	0,0188
Mn	250,2518	0,0250	371,1265	0,04
Ni	68,6202	0,0069	120,2651	0,0120
Cu	65,8944	0,0066	113,1076	0,0113
Zn	11,7784	0,01178	20,4631	0,0020
As	0,4083	0,00004	0,4337	0,00004
Se	14,6758	0,0015	20,1614	0,0020
Br	33,0474	0,0033	58,8351	0,0059
Sr	105,7909	0,0106	230,3311	0,0230
Mo	270,0488	0,027	516,0383	0,0516
Cd	4,7578	0,0004	9,2755	0,0009
I	360,3622	0,0364	745,2348	0,0745
Bi	1,8725	0,0002	5,5151	0,0005
S	498,6390	0,0498	1964,5990	0,1964
Co	237,2741	0,0237	464,9332	0,0464
V	27,9654	0,0028	36,6785	0,0037
Pb	30,0823	0,0030	37,7089	0,0038
Rb	11,3438	0,0011	28,9998	0,0029
Hg	0,7707	0,0001	6,1903	0,0006
Cs	57,0010	0,0057	126,7757	0,0127
Ba	190,6261	0,0191	100,4665	0,0100
Sb	13,6477	0,0014	19,5899	0,0019
Tl	4,3588	0,0004	4,5636	0,0005
Y	13,3122	0,0013	17,1733	0,0017
Nb	6,3972	0,0006	8,2759	0,0008
In	3,0981	0,0003	9,8218	0,0010
B	2699,0693	0,2699	5398,6011	0,5398
Ga	15,9165	0,0016	46,6438	0,0047
U	0,3061	0,00003	7,0101	0,0007
Ag	–	–	6,3808	0,0006
W	–	–	4,8081	0,0005

Анализ данных химического состава микроэлементов в сухом веществе и золе удобрения «Тезоро» показывает, что его минеральная часть содержит более 30 микроэлементов, среди которых преобладает бор. Массовая доля бора в сухом веществе 0,27 %, в золе – 0,54 %. Содержание йода в сухом веществе удобрения составляет 0,04 %, в золе – 0,07 %, молибдена – 0,03 и 0,05 %, титана – 0,12 и 0,27 %, марганца – 0,02 и 0,04 %, кобальта – 0,02 и 0,05 %, бария – 0,02 и 0,01 % соответственно. Значительно меньше меди, никеля, селена, молибдена, ванадия, цинка, брома, свинца. Доля этих микроэлементов находится в пределах от 30 до 68 мкг/г сухого вещества удобрения. Кадмий, висмут, бериллий, ртуть, и другие элементы присутствуют в виде следов.

Таким образом, исследование физико-химических свойств и химического состава гуматсодержащего удобрения «Тезоро» показало наличие в его составе широкого спектра биологически активных соединений, в том числе гуминовых веществ, низкомолекулярных органических кислот, фенол-карбоновых кислот, низкомолекулярных фенольных соединений, обладающих ростстимулирующими свойствами. Удобрение содержит широкий спектр макро- и микроэлементов, многие из которых необходимы растениям для роста, развития и повышения продуктивности.

РУП НПЦ НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству проведены испытания эффективности применения удобрения на основе гуминовых кислот «Тезоро» на ряде овощных и зеленных культур. Это удобрение оказало заметное влияние на рост, морфометрические показатели растений как открытого, так и защищенного грунта (табл. 4–6).

Таблица 4. Влияние удобрения «Тезоро» на морфометрические параметры растений томата в открытом и защищенном грунте

Table 4. Effect of 'Tesoro' fertilizer on morphometric parameters of tomato plants in open and protected soil

Вариант	Высота растения, см	Ширина куста, см	Количество, шт.	
			кистей	плодов
Открытый грунт				
Контроль	68	66,5	5	62
Гумирост (эталон), 2,6 л/га	77	78,5	6	73
Тезоро, 2,4 л/га	78	84,0	7	74
НСР _{0,5}	0,58	0,52	0,17	0,28
Защищенный грунт				
Контроль	184	–	6	30
Гумирост (эталон), 2,8 л/га	214	–	7	42
Тезоро, 2,6 л/га	236	–	9	45
НСР _{0,5}	0,52	–	0,18	0,31

В открытом грунте, по сравнению с контрольным и эталонным вариантами, высота растений увеличилась на 10 и 1 см, ширина куста – на 17,5 и 5,5 см, количество цветущих кистей – на 2 и 1 шт. и плодов – на 12 и 1 шт. соответственно. Биометрические измерения, проведенные после двух обработок растений в закрытом грунте, показали увеличение высоты растений по отношению к контролю на 52 см, к эталону – на 22 см, возросло также количество листьев, цветков, плодоносящих и цветущих кистей, плодов.

У растений огурца защищенного грунта длина главного лианообразного стебля увеличилась по отношению к контрольным растениям на 27,7 %, к эталонным – на 4,1 %. Растения огурца в контрольном варианте имели 4 боковых плети, в эталонном – 6, а в опытном – 7 боковых плетей, значительно увеличилось и количество листьев (табл. 5).

Таблица 5. Влияние удобрения «Тезоро» на морфометрические параметры растений огурца в открытом грунте

Table 5. Effect of 'Tesoro' fertilizer on morphometric parameters of cucumber plants in the open ground

Вариант	Длина главного лианообразного стебля, см	Количество, шт.	
		боковых плетей	листьев
Контроль	119	4	44
Гумирост (эталон), 2,4 л/га	146	6	50
Тезоро, 2,1 л/га	152	7	51
НСП _{0,5}	5,4	0,32	0,58

В конце опыта высота растений огурца защищенного грунта составляла 236 см, что превышало высоту растений контрольного и эталонного вариантов на 20,4 и 3,96 % (табл. 6). Количество листьев при этом было на уровне контрольных растений, но увеличивалось число боковых плетей, а средняя масса плода возрастала в сравнении с контрольным вариантом на 9,3 %, с эталоном – на 3,7 %.

Таблица 6. Влияние удобрения «Тезоро» на морфометрические параметры растений огурца в защищенном грунте

Table 6. Effect of 'Tesoro' fertilizer on morphometric parameters of cucumber plants in protected soil

Вариант	Высота растения, см	Количество, шт		Масса плода, г
		листьев	боковых плетей	
Контроль (без внесения удобрений)	196	52	7	129
Гумирост (эталон) 2,4 л/га	227	54	10	136
Тезоро, 2,2 л/га	236	51	12	141
НСП _{0,5}	0,52	0,34	0,42	2,4

В табл. 7 приведены морфометрические параметры салата кочанного, в табл. 8 – петрушки и кориандра.

Таблица 7. Влияние удобрения «Тезоро» на морфометрические параметры салата кочанного

Table 7. Effect of 'Tesoro' fertilizer on morphometric parameters of cabbage lettuce

Вариант	Высота растения, см	Количество листьев, шт	Ширина розетки, см	Диаметр кочана, см	Масса, г	
					листьев	корней
Контроль (без удобрений)	19,3	12	31,0	10,2	370,4	33,1
Гумирост (эталон) 1,5 л/га	20,0	12	32,4	11,2	390,0	31,6
Тезоро, 1,2 л/га	22,9	13	33,0	10,9	410,6	33,4
НСР _{0,5}	0,17	0,24	0,38	0,21	0,52	0,24

Под влиянием некорневых подкормок салата кочанного удобрением «Тезоро» увеличилась высота растений на 18,6 % по отношению к контрольным растениям и на 14,5 % к выращенным с эталоном – удобрением «Гумирост». Ширина розетки салата превышала контрольный вариант на 6,5 %, эталонный – почти на 2,0, общая масса листьев – на 10,7 и на 5,1 % соответственно.

Установлено, что при некорневых подкормках петрушки и кориандра удобрением на основе гуминовых кислот «Тезоро» их морфометрические показатели (высота растений, длина и ширина листа, количество листьев и др.) увеличились по сравнению с контрольным вариантом и эталоном (табл. 8).

Таблица 8. Влияние удобрения «Тезоро» на морфометрические параметры растений петрушки и кориандра

Table 8. Effect of 'Tesoro' fertilizer on morphometric parameters of parsley and coriander plants

Вариант	Высота растения, см	Количество листьев, шт.	Длина листа, см	Ширина листа, см
<i>Петрушка листовая</i>				
Контроль (без удобрений)	35,7	19	18,3	11,0
Гумирост (эталон), 1,7 л/га	35,0	19	19,1	10,6
Тезоро, 1,4 л/га	36,7	23	23,2	10,8
НСР _{0,5}	0,14	0,28	0,37	0,22
<i>Кориандр</i>				
Контроль (без удобрений)	33,8	19	14,2	10,6
Гумирост (эталон), 1,6 л/га	34,4	18	14,4	10,8
Тезоро, 1,3 л/га	35,7	20	14,9	10,7
НСР _{0,5}	0,38	0,24	0,21	0,18

Положительная динамика морфометрических показателей растений томата, огурца и зеленных культур во многом определила увеличение их урожайности и качественных показателей плодов (табл. 9).

Таблица 9. Влияние удобрения «Тезоро» на урожайность и качество плодов

Table 9. Effect of 'Tesoro' fertilizer on fruit yield and quality

Вариант	Урожайность, *т/га, **кг/м ²	Прибавка		Товарность плодов, %	Нитраты	
		т/га, кг/м ²	%		мг/кг	% к контролю
Томаты открытого грунта, т/га						
Контроль	25,0	–	–	74	24	–
Гумирост	36,0	11	44,0	79	25	+4,2
Тезоро	38,0	13	52,0	85	16	–33,3
НСР _{0,5}	0,22	–	–	–	0,46	–
Томаты защищенного грунта, кг/м ²						
Контроль	8,7	–	–	74	31	–
Гумирост	11,9	3,2	36,8	88	34	+3,2
Тезоро	12,5	3,8	43,7	89	25	–19,3
НСР _{0,5}	0,34	–	–	–	0,58	–

Вариант	Урожайность, *т/га, **кг/м ²	Прибавка		Товарность плодов, %	Нитраты	
		т/га, кг/м ²	%		мг/кг	% к контролю
Огурец открытого грунта, т/га						
Контроль	28,0	—	—	73	29	—
Гумирост	45,0	17	60,7	76	30	+3,4
Тезоро	46,0	18	64,3	87	23	–27,6
HCP _{0,5}	0,41	—	—	—	0,45	
Огурец защищенного грунта, кг/м ²						
Контроль	9,1	—	—	73	32	—
Гумирост	12,4	3,3	36,2	76	31	–3,1
Тезоро	12,9	3,8	41,8	87	24	–21,9
HCP _{0,5}	0,41	—	—	0,36	0,42	
Салат кочанный						
Контроль	0,7	—	—	77	—	—
Гумирост	1,5	0,8	114,3	93	—	—
Тезоро	1,8	1,1	157,1	95	—	—
HCP _{0,5}	0,24	—	—	—	—	—
Петрушка листовая						
Контроль	0,9	—	—	94	—	—
Гумирост	1,5	0,6	66,7	96	—	—
Тезоро	1,8	0,9	100,0	98	—	—
HCP _{0,5}	0,31				—	—
Кориандр						
Контроль	1,1	—	—	96	—	—
Гумирост	1,9	0,8	72,7	97	—	—
Тезоро	2,2	1,1	100,0	98	—	—
HCP _{0,5}	0,26	—	—	—	—	—

*Урожайность для открытого грунта.

**Урожайность для защищенного грунта.

Применение удобрения «Тезоро» обеспечило повышение урожайности плодов томата открытого грунта на 13 т/га (52,0 %) в сравнении с контролем и на 2 т/га (8 %) в сравнении с эталонным вариантом – удобрением «Гумирост». Урожайность плодов томата защищенного грунта при использовании удобрения «Тезоро» увеличилась на 3,8 кг/м² (43,6 %) по сравнению с контрольным вариантом и на 0,6 кг/м² (6,9 %) по сравнению с эталоном (11,9 кг/м²).

Урожайность плодов огурца открытого грунта в варианте с применением удобрения «Тезоро» увеличилась по сравнению с контролем на 18 т/га (64,3 %) и на 1 т/га (4,4 %) по сравнению с эталоном (45 т/га). Урожайность плодов огурца в закрытом грунте при трехкратном внесении гуматсодержащего удобрения «Тезоро» возросла на 3,8 кг/м² (41,8 %) и 0,5 кг/м² (5,5 %) соответственно.

Установлено, что урожайность петрушки при двукратном внесении гуматсодержащего удобрения «Тезоро» увеличилась на 0,9 кг/м² (100 %) по отношению к контролю и на 0,3 кг/м², или 33,3 % к урожайности в эталонном варианте. Урожайность кориандра и салата качанного по сравнению с контролем увеличилась на 100,0 и 157,1 % (1,1 кг/м²), а с эталоном – на 27,3 и 42,8 % соответственно.

Отмечено, что применение гуматсодержащего удобрения «Тезоро» при некорневых подкормках овощных культур в условиях как защищенного, так и открытого грунта, способствовало росту товарности продукции (см. табл. 9). Товарность плодов томата повысилась по отношению к контролю на 11–15 % и к эталону – на 1–6 %, плодов огурца – на 14–19 и 11–15 % соответственно.

Среди зеленых культур значительно увеличилась товарность салата кочанного в сравнении с контрольным вариантом (на 23,4 %), товарность петрушки и кориандра также имела тенденцию к увеличению и несколько превышала товарность продукции эталонного варианта.

Определен уровень нитратонакопления в плодах томата и огурца, выращенных с использованием некорневых обработок гуматсодержащим удобрением «Тезоро» в сравнении с эталонным и контрольным вариантами. Установлено, что трехкратное опрыскивание растений огурца и томата защищенного и открытого грунта приводило к значительному снижению содержания нитратов в конечной продукции, в том числе в сравнении с эталонным вариантом. Применение «Тезоро» снижало содержание нитратов в плодах огурца защищенного грунта на 21,9 %, открытого грунта – на 27,6, томата защищенного грунта – на 19,3, открытого грунта – на 33,3 %. Возможно, это связано с тем, что гуминовые вещества оказывают существенное влияние на азотный обмен растений и могут быть использованы в качестве эффективных ингибиторов нитратонакопления.

Заклучение. Разработана технология получения жидкого азотно-калиевого удобрения на основе гуминовых кислот «Тезоро», которая заключается во введении в раствор гуминового препарата, получаемого методом химической деструкции торфа, соединений азота, калия и микроэлементов, имеющих важное биологическое значение при выращивании овощных культур. Исследование химического состава удобрения показало наличие в его составе биологически активных соединений, в том числе гуминовых веществ, низкомолекулярных органических кислот, фенолкарбоновых кислот, низкомолекулярных фенольных соединений, обладающих ростстимулирующими свойствами, и широкого спектра макро- и микроэлементов, необходимых растениям для роста, развития и повышения продуктивности. Агрохимические испытания нового удобрения «Тезоро» показали высокую эффективность его применения на культурах огурца и томата защищенного и открытого грунтов, петрушке, салате и кориандре. Установлено, что использование удобрения «Тезоро» для некорневых подкормок способствовало улучшению морфометрических параметров растений: высоты, количества листьев, плетей огурца, кистей томата, плодов огурцов и томатов, их массы и товарности плодов, а также увеличению урожайности огурца защищенного грунта на 41,8 %, открытого грунта – на 64,3, томатов защищенного грунта – на 43,7, томатов открытого грунта – на 52,0, салата кочанного – на 157,1, петрушки и кориандра – на 100,0 %. Содержание нитратов в плодах огурца и томата в вариантах с внесением гумат-содержащего удобрения «Тезоро» снижалось на 25–33 %.

В настоящее время жидкое удобрение на основе гуминовых кислот «Тезоро» прошло государственную регистрацию, выпускается на одном из предприятий Беларуси и используется в растениеводстве не только на овощных, но и на зерновых культурах, кукурузе, рапсе, картофеле, льне, сахарной свекле.

Список использованных источников

1. Степуро, М. Ф. Научные основы интенсивных технологий овощных культур / М. Ф. Степуро. – Минск : Издат. Вараксин А. Н., 2011. – 295 с.
2. Степуро, М. Ф. Удобрение овощных культур / М. Ф. Степуро. – Минск : Беларус. навука, 2016. – 193 с.
3. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова. – Минск : Беларус. навука, 2009. – 328 с.
4. Биологически активные гуминовые препараты и различные аспекты их физиологического действия / Г. В. Наумова, Н. А. Жмакова, Т. Ф. Овчинникова [и др.] // Природопользование. – 1996. – Вып. 1. – С. 99–103.
5. Методы биохимического исследования растений / под ред. А. И. Ермакова. – Л. : Колос, 1972. – С. 112–113.
6. Волюнец, А. П. Методы определения фитогормонов, ингибиторов роста, дефолиантов и гербицидов / А. П. Волюнец, С. М. Моштаков. – Минск : Ураджай, 1973. – С. 39–43.
7. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) : учебник для студ. высших с.-х. учеб. завед. по агроном. спец. / Б. А. Доспехов. – 5-е изд., доп. и перераб. – М. : Агропромиздат, 1985. – 351 с.
8. Методика полевого опыта в овощеводстве и бахчеводстве / под ред. В. Ф. Белика, Г. Л. Бондаренко. – М. : Агропромиздат, 1979. – 210 с.

References

1. Stepuro M. F. *Nauchnye osnovy intensivnyh tekhnologij ovoshchnyh kul'tur* [Scientific foundations of intensive technologies of vegetable crops]. Minsk, Publ. Varaksin A. N., 2011, 295 p. (in Russian)
2. Stepuro M. F. *Udobrenie ovoshchnyh kul'tur* [Fertilization of vegetable crops]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2016, 193 p. (in Russian)
3. Tomson A. E., Naumova G. V. *Torf i produkty ego pererabotki* [Peat and products of its processing]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2009, 328 p. (in Russian)
4. Naumova G. V., Zhmakova N. A., Ovchinnikova T. F., Konoplya E. F., Makarova N. L., Ermakova S. S. *Biologicheski aktivnyie guminovyye preparaty i razlichnyie aspekty ih fiziologicheskogo deystviya* [Biologically active humic preparations and various aspects of their physiological action]. *Nature Management*, 1996, iss. 1, pp. 99–103. (in Russian)
5. *Metody biokhimicheskogo issledovaniya rastenij* [Methods of biochemical study of plants]. Ed. by A. I. Ermakov. Leningrad, 1987, pp. 112–113. (in Russian)
6. Volynec A. P., Moshtakov S. M. *Metody opredeleniya fitogormonov, ingibitorov rosta, defoliantov i gerbicidov* [Methods of determination of phytohormones, growth inhibitors, defoliant and herbicides]. Minsk, Harvest Publ., 1973, pp. 39–43. (in Russian)
7. Dospikhov B. A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy)* [Methods of field experiments (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985, 351 p. (in Russian)
8. *Metodika polevogo opyta v ovoshchevodstve i bahchevodstve* [Methodology of field experiment in vegetable and melon growing]. Ed. V. F. Belika, G. L. Bondarenko. Moscow, Agropromizdat Publ., 1979, 210 p. (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

Степура Мечислав Францевич – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, главный научный сотрудник, РУП НПЦ НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству (ул. Ковалева, 2а, 223013, Минская область, Минский район, аг. Самохваловичи, Беларусь). E-mail: mfstepuro@mail.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: nat.makarova05@gmail.com

Пась Полина Владимировна – научный сотрудник, РУП НПЦ НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству (ул. Ковалева, 2а, 223013, Минская область, Минский район, аг. Самохваловичи, Беларусь)

Матюк Тамара Васильевна – старший научный сотрудник, РУП НПЦ НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству (ул. Ковалева, 2а, 223013, Минская область, Минский район, аг. Самохваловичи, Беларусь)

Information about the authors

Nadezhda A. Zhmakova – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhmakova@mail.ru

Mechislav F. Stepuro – D. Sc. (Agricultural) Associate Professor, Chief Researcher, Research and Practical Center of National Academy of Sciences of Belarus for Potato and Fruit and Vegetable Growing (2a, Kovaleva Str., 223013, Minsk region, Minsk district, Samokhvalovich agricultural village, Belarus). E-mail: mfstepuro@mail.ru

Natalyia L. Makarova – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: nat.makarova05@gmail.com

Polina V. Pas – Researcher, Research and Practical Center of National Academy of Sciences of Belarus for Potato and Fruit and Vegetable Growing (2a, Kovaleva Str., 223013, Minsk region, Minsk district, Samokhvalovich agricultural village, Belarus)

Tamara V. Matyuk – Senior Researcher, Research and Practical Center of National Academy of Sciences of Belarus for Potato and Fruit and Vegetable Growing (2a, Kovaleva Str., 223013, Minsk region, Minsk district, Samokhvalovich agricultural village, Belarus)

ПОЛУЧЕНИЕ ФУЛЬВОПОДОБНЫХ КИСЛОТ МЕТОДОМ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ТОРФА

В. М. Крайко, В. М. Дударчик, Е. В. Ануфриева, Е. Л. Дудникова

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Разработан метод окислительной деструкции торфа, значительно увеличивающий выход водорастворимых фульвоподобных кислот. В качестве окислителя-деструктора гумуссодержащего сырья был выбран пероксид водорода, как наиболее простой в осуществлении и не загрязняющий реакционную среду побочными продуктами.

На осоковый и пушицевый торфа со степенью разложения 30–35 %, влажностью в пределах 40–70 % воздействовали пероксидом водорода в количестве 0,9–1,0 массовых частей по отношению к сухой массе торфа, при дробном введении по 10–25 % от полной дозы с последующим тщательным перемешиванием. В полученных после обработки препаратах значительно возрастает количество водо- и кислоторастворимых соединений.

Разработана методика оценки количества растворимых веществ после окислительной деструкции торфа, выход которых составил больше 20 %.

Ключевые слова: торф; групповой состав; гуминовые кислоты; фульвокислоты; фульвоподобные кислоты; окислительная деструкция.

Для цитирования. Крайко В. М., Дударчик В. М., Ануфриева Е. В., Дудникова Е. Л. Получение фульвоподобных кислот методом окислительной деструкции торфа // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 190–195.

PRODUCTION OF FULVIC ACIDS BY PEAT OXIDATIVE DESTRUCTION METHOD

V. M. Kraiko, V. M. Dudarchik, A. V. Anufrieva, E. L. Dudnikova

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

Abstract. A method for increasing the yield of fulvic acids from peat raw materials is proposed. On the basis of studies of group composition of the most typical and widespread peats in Belarus it is shown that humic acids contain up to 45 % of organic matter in them, while the yield of fulvic acids is low and contains about 15 % in the most humified samples. In order to use fulvic acids for practical purposes it is necessary to develop methods to increase their yield from raw materials. Oxidative destruction of peat by hydrogen peroxide was carried out as the most effective, easy to implement and not polluting the reaction medium with oxidizing by-products.

Hydrogen peroxide in the amount of 0.9–1.0 mass parts in relation to peat dry mass was applied to sedge and downy peat with the degree of decomposition of 30–35 %, moisture content in the range of 40–70 %, with the fractional injection of 10–25 % of the full dose followed by thorough mixing. The amount of water- and acid-soluble compounds significantly increases in the preparations obtained after treatment. The technique of the estimation of the amount of soluble substances after peat oxidative destruction, the yield of which was more than 20 %, was developed.

Keywords: peat; group composition; humic acids; humic acids; fulvic acids; fulvic-like acids; oxidative destruction.

For citation. Kraiko V. M., Dudarchik V. M., Anufrieva A. V., Dudnikova E. L. Production of fulvic acids by peat oxidative destruction method. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 190–195.

Введение. Одним из перспективных и наименее изученных направлений использования гумусовых препаратов является регулирование переноса тяжелых и редких металлов в природной и техногенной средах. Для этой цели можно использовать фульвокислоты (ФК) ряда каустобиолитов, в особенности торфа, специфичность которых заключается в том, что, с одной стороны, они являются водо- и кислоторастворимыми, а с другой – способными к взаимодействию с металлами, включая тяжелые, редкоземельные и другие, и в последние годы к ним резко возрос интерес разработчиков новейших технологий, специализирующихся на добыче указанных металлов, а также очистке техногенных отходов [1].

Ограничением в применении ФК является их невысокое содержание в природном сырье, составляющее порядка 5–15 %, для использования в практике необходимо разрабатывать методы увеличения их выхода из сырья. Перспективным приемом, позволяющим получать на основе торфа дешевые и экологически безопасные комплексообразователи является окислительная деструкция его органического вещества. Специфичность фракционного состава ГК торфа обуславливает их легкую окисляемость до водорастворимых соединений, обладающих комплексообразующими свойствами по отношению к металлам. Получаемые при этом водорастворимые кислоты гумусовой природы получили название «фульвоподобные» для того, чтобы подчеркнуть их отличие от природных ФК. Причем выходы получаемых при этом фульвоподобных кислот (ФПК) должны быть выше содержания ФК исходного сырья и получаемые ФПК должны по потребительским качествам быть не хуже натуральных, т. е. сохранять их свойства как по растворимости, так и по отношению к образованию комплексов с редкоземельными элементами, тяжелыми металлами, что является определяющим при их использовании в качестве добавок в геотехнологические растворы в технологиях подземноскважинного, чанового либо кучного выщелачивания.

ФПК представляют собой продукты направленного каталитического окисления природных каустобиолитов (в частности, некоторых торфов высокой степени гумификации), водорастворимые в широком диапазоне pH, способные к комплексообразованию с тяжелыми металлами за счет наличия в их составе функциональных групп, представляющих собой в основном фенольные гидроксилы и карбоксильные группы.

Идея работы заключается в подборе условий мягкого дозированного окисления высокомолекулярных гумусовых веществ (ГВ) и переводом их в ФК или ФПК с увеличением выхода целевого продукта. Недоокисление или чересчур жесткое окисление не позволяет получать продукты с необходимыми качественными показателями.

Материалы и методы исследований. Сырьем для получения комплексообразующих веществ могут служить природные материалы (каустобиолиты), в составе которых в значительном количестве присутствуют ГВ, состоящие, как известно, из гуминовых кислот (ГК) и ФК. К таким материалам относятся торф, бурый уголь, сапропель.

Объектами исследований послужили торфы различных типов и видов. Из низинных видов торфа выбраны осоковый, из переходных – древесный и осоково-сфагновый, из верховых – сосново-пушицевый и пушицево-сфагновый. Их степень разложения и ботанический состав, определенные микроскопическим методом, представлены в табл. 1. Из приведенных характеристик видно, что исследуемые образцы торфа являются типичными и широко распространены в Беларуси.

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Table 1. Characteristics of research objects

Месторождение	Вид торфа	Ботанический состав, %	Степень разложения, %	Зольность А _c , %
Славное	Сосново-пушицевый	Пушица – 60; сосна – 15; сфагновый магелланикум – 20; сфагновый фускум – ед.; сфагновый ангустифолиум – 5	40	1,5
	Пушицево-сфагновый	Сосна – 5; пушица – 50; сфагновый магелланикум – 35; сфагновый ангустифолиум – 10	35	1,6
	Пушицево-сфагновый	Сосна – ед.; пушица – 35; сфагновый магелланикум – 45; сфагновый ангустифолиум – 10	30	1,3
Есмоновский мох	Сосново-пушицевый	Сосна – 20; пушица – 40; сфагновые мхи – 30; шейхцерия – 10	40	1,4
	Древесный переходный	Сосна – 25; береза – 25; тростник – 5; пушица – 10; осоки – 15; сфагновые мхи – 20	45	2,5
	Осоково-сфагновый переходный	Береза – 5; тростник – 10; вахта – 5; осоки – 30; пушица – 15; сфагновые мхи – 35	35	2,2
Туршевка-Чертово	Пушицевый	Сосна – 10; пушица – 80; сфагновые мхи – 10	35	1,2
	Осоковый	Осока – 75; тростник – 15; гипновый мох – 10	30	2,2

Торф имеет сложный и разнородный химический состав. В него входят почти все группы органических соединений, слагающих исходное растительное вещество. Групповой состав торфа является наиболее полной его характеристикой, которая дает представление о содержании в нем основных групп органических соединений: битумов, легко- и трудногидролизующих веществ, гуминовых веществ и «лигнина» (негидролизующего остатка).

Групповой состав торфа определяли по методу Инсторфа [2]. Результаты определения группового состава представлены в табл. 2.

Таблица 2. Групповой состав органического вещества торфа

Table 2. Group composition of peat organic matter

Место-рождение	Вид торфа	Степень разложения	Битумы	Легкогидролизуемые вещества	Трудногидролизуемые вещества	Гуминовые вещества			Негидролизуемый остаток
						всего	ГК	ФК	
						% на органическую массу торфа			
Славное	Сосново-пушицевый	40	8,1	20,1	7,8	50,5	37,2	13,3	13,5
	Пушицево-сфагновый	35	7,3	25,1	8,1	51,1	36,6	14,5	8,4
		30	6,1	26,9	13,1	41,9	28,8	13,1	12,1
Есмоновский Мох	Сосново-пушицевый	40	8,2	23,2	6,7	51,5	38,0	13,5	10,4
	Древесный переходный	45	7,3	13,8	2,7	65,5	45,8	19,7	10,7
	Осоково-сфагновый	35	7,7	18,3	4,3	59,5	40,8	18,7	10,2
Туршевка-Чертово	Пушицевый	35	7,9	22,8	8,3	48,3	34,8	13,5	12,7
	Осоковый	30	3,7	24,5	13,3	48,6	35,9	12,7	9,9

Как видно из полученных данных, в зависимости от вида торфа и степени разложения содержание битумов колеблется от 3,7 до 8,2 %. Углеводный комплекс торфа представлен легкогидролизующими и трудногидролизующими веществами. Содержание легкогидролизующих веществ исследуемых образцов торфа колеблется от 13,8 до 26,9 % органической массы. В исследованных образцах количество трудногидролизующих веществ колеблется в пределах 2,7–13,3 % на органическую массу торфа. Как видно из полученных данных исследуемых образцов торфа, суммарное содержание гуминовых веществ находится в пределах 41,9–65,5 %. Характерно, что ГК на фоне ФК преобладают во всех исследованных образцах. Их содержание составляет от 28,8 до 45,8 %, ФК – от 12,7 до 19,7 % органической массы торфа. Негидролизующий остаток (лигнин) в исследуемых образцах изменяется в пределах 8,4–13,5 %.

Таким образом, на основании исследований группового состава каустобиолитов мы выбрали для дальнейшей работы в качестве наиболее перспективного сырья два вида торфа месторождения Туршевка-Чертово: низинный, осоковый, $R = 30$ %, $W = 47,7$ %, $A^c = 2,2$ % и верховой, пушицевый, $R = 35$ %, $W = 43,2$ %, $A^c = 1,2$ %.

Для увеличения выхода ФПК из каустобиолитов наиболее перспективным является использование метода окислительной деструкции гуминовых веществ. В качестве окислителя-деструктора гумус-содержащего сырья был выбран пероксид водорода как наиболее простой в осуществлении, самый перспективный и не загрязняющий реакцию среду побочными продуктами. Окисление органических веществ пероксидом водорода представляет собой достаточно мягкое воздействие по сравнению с рядом других окислителей и, как правило, ограничивается окислением отдельных специфических групп [3–5]. Пероксид водорода – экологически чистый окислитель, его применение не приводит ко вторичному загрязнению продуктами разложения реагента, кроме того, его можно использовать в широком диапазоне pH. В зависимости от pH среды пероксид водорода может действовать по-разному: в щелочной среде – как нуклеофильный реагент, в кислой и нейтральной (водной) среде – как электрофильный. При этом происходит образование карбонильных и карбоксильных групп, а щелочная среда способствует более целенаправленному превращению органических соединений при окислении в карбоновые кислоты.

Механизм окислительной деструкции ГК торфа до конца не выяснен. Доказано, что в ГК торфа конденсированные ароматические ядра соединены мостиками с непредельными связями, обеспечивающими полисопряжение. Разрушение таких мостиков при окислении ведет к уменьшению размеров систем полисопряжения. Вместе с этим происходит уменьшение молекулярных масс ГК и образование водорастворимых продуктов, обогащенных кислыми функциональными группами. В отличие от ГК такие продукты не выпадают в осадок в кислой среде при pH = 1,0–2,0 [6, 7].

Окисление торфа осуществляли введением в него окислителя следующим образом. Торф измельчали, просеивали через сито с размером ячеек 3 мм. Навески торфа по 10 г на с. в. ($W = 40\text{--}50\%$) помещали в отдельные емкости, в которые при постоянном перемешивании вводили пероксид водорода (30 %) в соотношении H_2O_2 : ОБ торфа, равном 1 : 1. После введения окислителя через небольшой промежуток времени наблюдался разогрев смеси. Температура в процессе обработки поднималась до $60\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$. После снижения температуры реакционные смеси перемешивали и оставляли на сутки. Затем их заливали водой (1 : 10 на ОБ торфа) и еще сутки настаивали при комнатной температуре для экстракции ФПК.

Фильтровали нерастворившийся остаток, промывали водой до обесцвечивания фильтрата. Определяли оптическую плотность фильтрата ($pH = 1,5\text{--}2,0$).

Выпаривали фильтрат на водяной бане во взвешенных чашках. Остаток на фильтре высушивали в сушильном шкафу при температуре $40\text{ }^\circ\text{C}$ до постоянного веса.

Находили значение веса растворенного остатка (A_p) и остатка на фильтре (A_c).

Выход растворимых веществ определяли несколькими способами:

1) по сухому остатку, %:

$$B_c = \frac{A - A_c}{A} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где A – исходная навеска торфа до обработки, с. в.; A_c – остаток обработанного торфа после удаления растворимых соединений;

2) по растворимому остатку, %:

$$B_p = \frac{A_p \cdot 100}{A}, \quad (2)$$

где A_p – сухой остаток перешедших в раствор веществ, после обработки торфа пероксидом водорода, растворения в воде и выпаривания.

Результаты и их обсуждение. Проведенные эксперименты по выделению ФПК из различных торфов показали, что при обработке низинного торфа пероксидом водорода осуществлялся разогрев реакционной смеси, при окислении верхового торфа повышение температуры не происходило. Аналогичные явления наблюдали авторы работы [8], которые предположили, что на ход процесса окисления оказывает влияние содержание ионов железа в торфе. Была выполнена следующая серия опытов.

Взяли по две навески по 10 г на ОБ пушицевого и осокового торфа. В одну из навесок пушицевого и соответственно осокового торфа внесли растворенную соль железа хлористого в количестве 5 мг/г торфа. Такое количество железа соответствует его содержанию в низинном торфе. Смеси тщательно перемешали и дали подсохнуть до влажности исходного торфа, после чего провели окисление пероксидом водорода в соотношении H_2O_2 : ОБ торфа, равном 1 : 1. В пробах с низинным торфом реакционную смесь разогрели до температуры $70\text{ }^\circ\text{C}$, в верховом торфе окисление с добавкой железа осуществляли при температуре $68\text{ }^\circ\text{C}$, без добавки – при температуре $21\text{ }^\circ\text{C}$. Результаты эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 3. Влияние условий выделения на температуру реакции и выход фульвоподобных кислот

Table 3. Effect of extraction conditions on reaction temperature and yield of fulvic-like acids

Количество Fe^{3+} , мг/г	T , $^\circ\text{C}$	Оптическая плотность, D	pH	Выход ФПК, %
<i>Пушицевый торф</i>				
0	21	0,31	2,0	10,9
5	68	0,54	1,5	24,0
<i>Осоковый торф</i>				
0	70	0,27	1,9	23,5
5	90	0,30	1,7	22,6

Как видно из полученных данных, добавка соединений железа в верховой торф повышает температуру процесса окисления, оптическую плотность раствора ФПК, а также выход продуктов окисления в 2 раза, pH при этом уменьшается. Добавка ионов железа в низинный торф не приводит к существенным изменениям, незначительно увеличиваются температура процесса и оптическая плотность, уменьшается pH , но при том не изменяется выход продукта.

Для определения выхода водорастворимых веществ торфа при его окислении пероксидом водорода пробы низинного и верхового торфа обрабатывали по изложенной выше методике. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4. Выход водорастворимых веществ торфа**Table 4. Output of water-soluble substances of peat**

Проба	Сухой остаток после выделения водорастворимых соединений (A_c)	Количество перешедших в раствор ФПК (по разности) ($A^* - A_c$)	Выход (B_c), %	Количество перешедших в раствор ФПК после выпаривания (A_p)	Выход (B_p), %
Торф низинный**	7,64	2,35	23,5	2,29	22,9
Торф верховой***	7,60	2,40	24,0	2,22	22,2

* Исходная навеска (A) – 10,0 г.** Осоковый, $W = 47,7$ %; $A^c = 2,1$ %.*** Пушицевый, $W = 43,2$ %; $A^c = 1,2$ %.

Из полученных данных видно, что значения выхода ФПК, рассчитанные по взвешиванию сухого остатка после выделения водорастворимых веществ и по количеству перешедших в раствор веществ, практически совпадают и составляют около 24 %.

Закключение. ГВ являются универсальными природными комплексообразователями, образуют устойчивые растворимые комплексы с металлами и их соединениями в широком диапазоне pH, поэтому препараты на их основе должны также обладать способностью растворяться в тех же пределах pH. Особую роль в этом процессе играют ФК. Меньшая молекулярная масса, менее конденсированное ароматическое ядро и высокое содержание полярных групп обуславливают лучшую растворимость и подвижность ФК и их комплексов по сравнению с ГК.

Как следует из литературных данных и проведенных исследований, в торфе может содержаться до 45 % от органического вещества ГК, выход же ФК невысок и составляет около 15 %. Количество ФК в органическом веществе сапропеля еще меньше – 5–7 %, выход водорастворимых органоминеральных соединений из бурого угля составляет 2 % на органическую массу.

Для использования ФК в практических целях необходимо разрабатывать методы увеличения их выхода из сырья. Перспективным приемом, позволяющим получать на основе торфа дешевые и экологически безопасные комплексообразователи, является окислительная деструкция его органического вещества. Специфичность фракционного состава ГК торфа обуславливает их легкую окисляемость до водорастворимых ФПК, обладающих комплексообразующими свойствами по отношению к металлам.

Процессы деструкции каустобиолитов окисляющими агентами требуют точной дозировки и соотношения реагирующих масс, температуры, времени и тщательного соблюдения других условий ведения процесса, так как низкая степень деструкции продукта приведет к невысокому выходу целевых кислоторастворимых фульвоподобных продуктов, а высокая – к потере каркасной структуры ФК, что естественным образом скажется на качестве получаемого конечного продукта. Наиболее перспективным является метод окислительной деструкции гуминовых веществ с использованием пероксида водорода как наиболее эффективного, простого в осуществлении и не загрязняющего реакционную среду побочными продуктами.

С целью получения ФПК использовали как осоковый, так и пушицевый торф со степенью разложения 30–35 % и влажностью в пределах 40–70 %, на который воздействовали пероксидом водорода в количестве 0,9–1,0 массовых частей по отношению к сухой массе торфа, при дробном введении по 10–25 % от полной дозы с последующим тщательным перемешиванием.

Установлено, что выход водорастворимых веществ после окислительной деструкции как низинного, так и верхового торфа составил около 24 %.

Список использованных источников

1. Волков, И. В. Реакции микроэлементов с гуминовыми кислотами как основа сорбционной дезактивации и очистки техногенных отходов : дис. ... канд. хим. наук : 02.00.04 / Волков Илья Владимирович. – Екатеринбург, 2016. – 164 л.
2. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы его определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
3. Кухаренко, Т. А. Окисленные в пластах бурые и каменные угли / Т. А. Кухаренко. – М. : Наука, 1972. – 214 с.
4. Верхованова, Н. Т. Исследование продуктов окислительной деструкции сапропелитов / Н. Т. Верхованова, В. В. Тутурина // Химия твердого топлива. – 1977. – № 1. – С. 17–23.
5. Влияние обработки бурого угля перекисью водорода на выход буроугольного воска / О. В. Базарова, А. Г. Шевченко, И. В. Рубан [и др.] // Химия твердого топлива. – 1990. – № 5. – С. 18–21.
6. Бамбалов, Н. Н. Деструкция гуминовых кислот торфа пероксидом водорода / Н. Н. Бамбалов, Т. П. Смычник // Весті Академії навук БССР. Серія хімічних навук. – 1986. – № 3. – С. 75–78.

7. Смычник, Т. П. Влияние пероксида водорода на деструкцию фракций ГК торфа / Т. П. Смычник, В. М. Дударчик // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2000. – № 1. – С. 109–112.
8. Смычник, Т. П. Влияние соединений железа на окислительную деструкцию торфа пероксидом водорода / Т. П. Смычник, Н. Н. Бамбалов // Природопользование. – 2011. – Вып. 19. – С. 176–179.

References

1. Volkov I. V. *Reakcii mikroelementov s guminovymi kislotami kak osnova sorbcionnoj dezaktivacii i ochistki tekhnogenykh othodov*. Diss. kand. him. nauk [Reactions of trace elements with humic acids as a basis for sorption decontamination and purification of technological waste. Dr. chem. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2016, 164 p. (in Russian)
2. Lishtvan I. I., Korol' N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ego opredeleniya* [The basic properties of peat and methods for determining it]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1975, 320 p. (in Russian)
3. Kukhareno T. A. *Okislennye v plastakh burye i kamennye ugli* [Brown and stone coals oxidized in layers]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 214 p. (in Russian)
4. Verkhodanova N. T., Tuturina V. V. *Issledovanie produktov oksidativnoy destruktii sapropelitov* [Research of oxidative destruction of sapropelites]. *Khimiya tverdogo topliva = Chemistry of Solid Fuel*, 1977, no. 1, pp. 17–23. (in Russian)
5. Bazarova O. V., Shevchenko A. G., Ruban I. V., et al. *Vliyanie obrabotki burogo uglya perekis'yu vodoroda na vykhod burogo/nogo voska* [The impact of brown coal treatment with hydrogen peroxide on the output of a brown-over wax]. *Khimiya tverdogo topliva = Chemistry of Solid Fuel*, 1990, no. 5, pp. 18–21. (in Russian)
6. Bambalov N. N., Smychnik T. P. *Destrukciya guminovykh kislot torfa peroksidom vodoroda* [Destruction of humic acids peat with hydrogen peroxide]. *Vesci Akademii navuk BSSR. Seriya himichnykh navuk = Izvestia of the Academy of Sciences of the BSSR. Series of Chemical Sciences*, 1986, no. 3, pp. 75–78. (in Russian)
7. Smychnik T. P., Dudarchik V. M. *Vliyanie peroksida vodoroda na destruktivnyy fraktsii GK torfa* [The effect of hydrogen peroxide on the destruction of the fractions of the Civil Code of Peat]. *Vesci Akademii navuk BSSR. Seriya himichnykh navuk = Izvestia of the Academy of Sciences of the Belarus. Series of Chemical Sciences*, 2000, no. 1, pp. 109–112. (in Russian)
8. Smychnik T. P., Bambalov N. N. *Vliyanie soedinenij zheleza na oksidativnoy destruktivnyy torfa peroksidom vodoroda* [The effect of iron compounds on oxidative destruction of peat with hydrogen peroxide]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2011, no. 19, pp. 176–179. (in Russian)

Информация об авторах

Дударчик Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: dudwladm@gmail.com

Крайко Валентина Михайловна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: vvkraiko@gmail.com

Ануфриева Елена Владимировна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru

Дудникова Евгения Леонидовна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: dudnikova13@list.ru

Information about the authors

Vladimir M. Dudarchik – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Associate Professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: dudwladm@gmail.com

Valiantsina M. Kraiko – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Associate Professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: vvkraiko@gmail.com

Alena V. Anufrieva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru

Evgeniya L. Dudnikova – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: dudnikova13@list.ru

ФИТОТОКСИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФУЛЬВОПОДОБНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОРФА

М. А. Шелоник, Ю. Г. Янута

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Исследованы фитотоксические свойства препаратов, полученных из торфяного сырья методом окислительной деструкции в зависимости от типа торфа и срока хранения препарата. Установлено, что фульвоподобные соединения, выделенные из верхового торфа, оказывали стимулирующее действие на корни редьки масличной (*Brassica rapa*), в то время как соединения, выделенные из низинного торфа, либо проявляли слабое токсическое действие, либо не оказывали никакого эффекта. Установлено, что срок хранения наработанных сухих препаратов сказывается на их фитотоксических свойствах путем снижения энергии прорастания редьки масличной (*Brassica rapa*). Отмечается, что энергия прорастания фульвоподобных соединений после 6-летнего хранения была в 1,12–1,16 раз выше по сравнению с препаратом 12-летней давности.

Ключевые слова: фитотоксичность; фульвоподобные кислоты; растительные тест-объекты; биометрические показатели; торф.

Для цитирования. Шелоник М. А., Янута Ю. Г. Фитотоксические свойства фульвоподобных соединений торфа // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 196–202.

PHYTOTOXIC PROPERTIES OF THE FULVO-LIKE COMPOUNDS OF PEAT

M. A. Shelonik, Yu. G. Yanuta

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

Abstract. The phytotoxic properties of preparations obtained from peat raw materials by the method of oxidative destruction depending on the type of peat and the shelf life of the preparation have been studied in the work. It was found that fulvic-like compounds isolated from high-moor peat had a stimulating effect on the roots of the test object, while compounds isolated from lowland peat showed either a weak toxic effect or had no effect. It was found that the shelf life of the developed dry preparations affects their phytotoxic properties by reducing the germination energy of test cultures. It is noted that the germination energy of fulvic-like compounds after 6 years of storage was 1.12–1.16 times higher compared to the 12-year-old preparation.

Keywords: phytotoxicity; fulvic-like acids; plant test objects; biometric indicators; peat.

For citation. Shelonik M. A., Yanuta Yu. G. Phytotoxic properties of the fulvo-like compounds of peat. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 196–202.

Введение. С момента выделения гуминовых соединений из природного сырья сфера их практического использования расширяется. Традиционным направлением использования гуминовых препаратов считается их применение для нужд сельского хозяйства, в первую очередь как подкормки для растений [1, 2]. В качестве исходного сырья для их производства используют торф, бурый и каменный уголь, леанардит и другие каустоболиты. В Республике Беларусь основным сырьем для производства водорастворимых гуминовых препаратов является торф. Согласно данным [3], Беларусь входит в тройку мировых стран по объемам добычи торфа, при этом более 10 % добываемого торфа применяется в нетопливных целях. Как показано в работе Пантелеева [4], перспективным направлением использования препаратов глубокой переработки торфа является производство кислоторастворимых соединений, повышающих миграционную подвижность металлов. По существующей классификации гуминовые вещества, растворимые в кислой среде, относятся к фульвокислотам. С целью отличия природных фульвокислот, выделение которых происходит путем незначительного изменения структуры, нами исследованы соединения, полученные путем деструкции исходного торфяного сырья. В дальнейшем такие соединения станем называть фульвоподобными кислотами (ФПК). Учитывая повышенную подвижность тяжелых металлов (ТМ), ФПК можно рассматривать как перспективные материалы для фиторемедиации территорий, загрязненных ТМ [5].

Фитотестирование как разновидность биотестирования издавна используют для определения качества семян, плодородия почв сельскохозяйственных, в биомедицинских исследованиях и относительно недавно стали применять в природоохранной сфере для оценки экологического качества природных

сред (например, вод и почв) [6, 7]. Высшие растения позволяют оценить объект исследований комплексно. Это дает возможность уже на первой стадии выявить лимитирующие факторы и более детально их исследовать.

При подборе тест-объектов для проведения фитотестирования предлагается использовать список растений согласно ISO 22030:2005. При этом следует учитывать, что в качестве тест-объектов подходят растительные виды, обладающие следующими характеристиками:

- 1) растения С4-типа (например: кукуруза, сахарный тростник, просо);
- 2) растения, состоящие в симбиозе с азотфиксирующими бактериями (например, бобовые);
- 3) растения экологически и экономически значимые для исследуемого региона (например, для Республики Беларусь: из двудольных растений – это рапс, сахарная свекла, лен, клевер; однодольные растения в основном представлены злаковыми – овсом, ячменем, рожью, пшеницей).

В качестве объектов для тестирования ксенобиотиков, таких как полициклические ароматические углеводороды, нефтепродукты, тяжелые металлы в фитотестах чаще всего применяют сорго, кресс-салат, редьку масличную, горчицу белую, ячмень и другие растения, поскольку они демонстрируют избирательную чувствительность к различным видам этих веществ. Сорго и горчица, благодаря своей высокой чувствительности, широко используются для оценки воздействия нефтепродуктов [8, 9]; кресс-салат, ячмень, пшеница – для определения токсичности пестицидов [10]; редька масличная – для выявления некоторых тяжелых металлов [11].

Цель работы – изучить фитотоксические свойства ФПК в зависимости от типа торфа и срока хранения ранее наработанных ФПК.

Материалы и методы исследования. В качестве исходного сырья для получения ФПК использовали торф из месторождения «Туршовка-Чертово» (Крупский район, Минская область). Общетеchnические характеристики определяли согласно [12]. Результаты анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1. Общетеchnические характеристики исходного сырья

Table 1. General technical characteristics of the feedstock

Образец	Глубина отбора, см	Зольность, %	Тип торфа	Степень разложения, %
1	20–40	7,4	Низинный	35–40
2	40–60	1,2	Верховой	35

ФПК извлекали путем обработки исходного торфа перекисью водорода согласно методике [13]. Извлечение ФПК осуществляли с помощью последовательной трехкратной обработки окисленного образца торфа водой в соотношении окисленный торф : вода, равном 1 : 10. Затем выдерживали смеси в течение 1 ч на лабораторном шейкере WiseShake SHO-1D при 130 об/мин. После этого образец отстаивали в течение 15 мин, жидкую фракцию декантировали и фильтровали на беззольном фильтре типа «Белая лента». Полученный фильтрат объединяли, переносили в выпарную чашку и высушивали в вакуум-шкафу при температуре 50 °С при разряжении 0,98 атм. После сушки образец измельчали и хранили в вакуум-эксикаторе над P₂O₅.

Для исследования фитотоксических свойств использовали ФПК из верхового и низинного торфа, а также наработанные ФПК 6- и 12-летней давности. Водные вытяжки из ФПК получали согласно СТБ 17.13.05-36-2015. Из-за кислой среды (рН от 1,0–3,0), ФПК могут оказывать токсическое действие на растения, поэтому рН доводили до значений 6,0–7,0 добавлением 0,1 н. щелочи. Готовые вытяжки после разбавляли в 10, 100 и 1000 раз дистиллированной водой. В чашки Петри раскладывали фильтровальную бумагу, на которой равномерно распределяли 10 семян тест-объекта, в качестве которого в эксперименте использовали семена редьки масличной (*Brassica rapa*) с величиной всхожести не менее 80 %, предварительно прошедшие лабораторный контроль качества на всхожесть согласно ГОСТ 12038-84. Затем в каждую чашку вносили 5 мл исследуемых вытяжек. В качестве контроля использовали дистиллированную воду. Подготовленные таким образом образцы помещали в термощкаф ТС80М-2 при температуре 23,8 °С. Результаты развития тест-культур фиксировали каждые 24 ч. Оценку фитотоксических свойств осуществляли после 72 ч экспозиции. Повторность опыта – трехкратная.

Оценку результатов исследований проводили по таким показателям, как энергия прорастания семян, длина проростков и корней, биомасса надземной части. На основании имеющихся показателей рассчитывали индекс токсичности (ИТФ) для определения класса опасности по формуле [6]:

$$\text{ИТФ}_{\text{общ.}} = \frac{T_{01} / T_{k1} + T_{02} / T_{k2} + T_{03} / T_{k3}}{3},$$

где T_{01} – значение опыта одного показателя (например, длина корневой части); T_{k1} – значение контроля одного показателя; T_{02} – значение опыта второго показателя; T_{k2} – значение контроля второго показателя; T_{03} – значение опыта третьего показателя; T_{k3} – значение контроля третьего показателя.

Полученные значения интерпретировали следующим образом: VI класс (ИТФ > 1,10) – фактор, оказывает стимулирующее действие на тест-объект; V класс (ИТФ = 0,91–1,10) – фактор не оказывает существенного влияния на развитие тест-объекта, т. е. величина тест-функции находится на уровне контроля; IV класс (ИТФ = 0,71–0,90) – низкая токсичность; III класс (ИТФ = 0,50–0,70) – средняя токсичность; II класс (ИТФ < 0,50) – высокая токсичность фактора, I класс (среда непригодна для жизни тест-объекта) – сверхвысокая токсичность, вызывающая гибель тест-объекта [11].

Результаты и их обсуждение. Полученные результаты исследований фитотоксичности представлены в табл. 2 и на рис. 1–5.

Таблица 2. Исследование индекса токсичности фульвоподобных кислот, выделенных из торфа

Table 2. Study of toxicity index of fulvic acids isolated from high-moor and low-moor peat

Образец	Разбавление	Длина, см		Биомасса надземной части, г	Энергия прорастания, %	Т ₀ /Т _к			Класс токсичности по ИТФ
		корней	проростков			корневой части	надземной части	биомассы надземного растения	
Контроль	–	1,815 ± 0,148	1,030 ± 0,071	0,749	86	–	–	–	–
ФПС из верхового торфа	1 : 10	2,320 ± 0,071	1,246 ± 0,381	1,215	93	1,278	1,209	1,622	VI
	1 : 100	2,875 ± 0,162	1,010 ± 0,127	0,791	90	1,584	0,981	1,056	VI
	1 : 1000	2,625 ± 0,191	1,695 ± 0,120	0,816	90	1,446	1,645	1,090	VI
ФПС из низинного торфа	1 : 10	1,955 ± 0,145	0,925 ± 0,216	0,895	86	1,077	0,898	1,195	V
	1 : 100	1,920 ± 0,989	0,755 ± 0,021	0,697	83	1,057	0,733	0,930	V
	1 : 1000	1,996 ± 0,608	1,083 ± 0,295	0,1418	83	1,100	1,051	0,189	IV

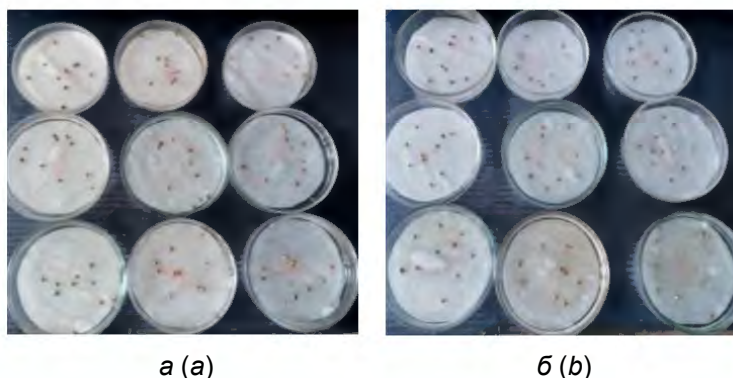


Рис. 1. Начало эксперимента по фитотестированию для фульвоподобных кислот, выделенных из низинного (а) и верхового (б) торфа при разведении в 10, 100, 1000 раз (сверху вниз)

Fig. 1. Beginning of the phytotesting experiment for fulvic-like acids isolated from lowland (a) and high-moor (b) peat at dilutions of 10,100,1000 times (top to bottom)

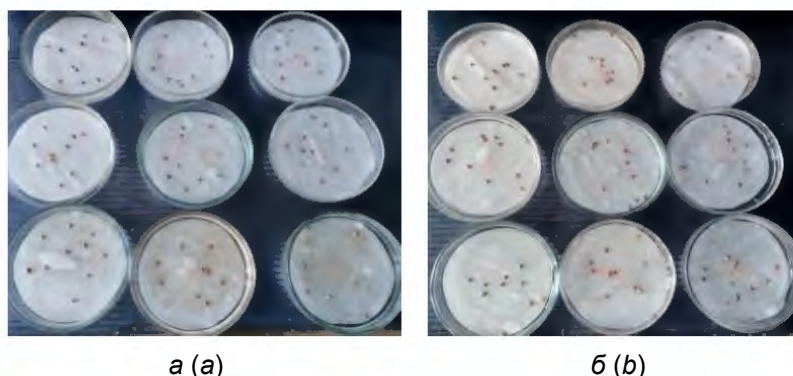


Рис. 2. Результаты фитотестирования через 1 сут для фульвоподобных кислот, выделенных из низинного (а) и верхового (б) торфа при разведении в 10, 100, 1000 раз (сверху вниз)

Fig. 2. Results of phytotesting after 1 day for fulvic-like acids isolated from lowland peat (a) and high-moor (b) peat at dilution of 10, 100, 1000 times (top to bottom)

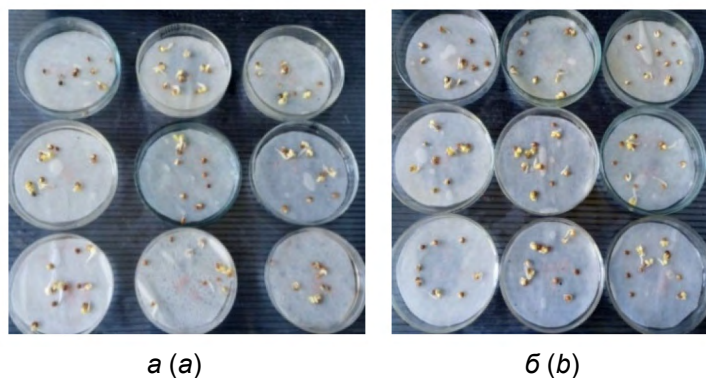


Рис. 3. Результаты фитотестирования через 2 сут для фульвоподобных кислот, выделенных из низинного (а) и верхового (б) торфа при разведении в 10, 100, 1000 раз (сверху вниз)

Fig. 3. Results of phytotesting after 2 days for fulvic-like acids isolated from lowland peat (a) and high-moor (b) peat at dilution of 10, 100, 1000 times (top to bottom)

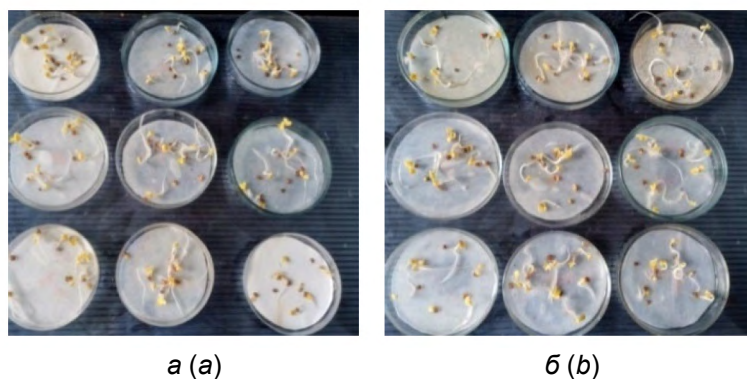


Рис. 4. Результаты фитотестирования через 3 сут для фульвоподобных кислот, выделенных из низинного (а) и верхового (б) торфа при разведении в 10, 100, 1000 раз (сверху вниз)

Fig. 4. Results of phytotesting after 3 days for fulvic-like acids isolated from lowland peat (a) and high-moor (b) peat at dilution of 10, 100, 1000 times (top to bottom)



Рис. 5. Состояние корневой системы после фитотестирования при разведении 1 : 1000 для верхового (а) и низинного (б) торфа

Fig. 5. The state of the root system after phytotesting at a dilution of 1 : 1000 for high-moor (a) and low-moor (b) peat

Визуальная оценка динамики развития растений показала, что в течение первых 48 ч с момента начала опыта значительных отличий в темпах прорастания и развития семян редьки масличной не было зафиксировано. Значимые изменения в развитии растений отмечаются через 72 ч с начала опыта. Данные различия связаны с тем, что тест-культура на первых этапах развития потребляет питательные вещества, содержащиеся в семядолях. По исчерпанию их зародыш активно потребляет вещества из окружающей среды [13].

Наибольшее значение из всех показателей приходится на состояние корней (или корневой системы), поскольку именно они в первую очередь находятся в непосредственном контакте с действующим токсическим веществом. При высоких значениях токсических веществ в растениях нарушается транспорт ионов и работа некоторых ферментов, в результате чего доступность микро- и макроэлементов в корне изменяется. Визуально на растениях это отображается в виде почернения корней [14].

Исходя из анализа данных, которые приведены в табл. 1, установлено, для верхового торфа отмечается стимулирующее действие по отношению к растению, в то время как для низинного торфа видимых эффектов не наблюдается. Полученные результаты можно объяснить рН исходных вытяжек. Верховой торф, как правило, имеет кислую среду и низкий уровень питательных веществ в отличие от низинного торфа. Оптимальный уровень рН в ФПК способствует лучшему усвоению растениями необходимых питательных веществ. В то же время отклонения рН от нейтральных значений могут нанести вред корневой системе, что негативно скажется как на поглощении воды и питательных веществ, так и, следовательно, на росте и урожайности растений.

Кроме типа торфа на фитотоксичность влияет и срок хранения сухих препаратов ФПК. Со временем свойства препаратов могут изменяться, что в результате может привести к ингибированию роста растений, вплоть до их смерти [15].

По результатам исследования токсичности ФПК после его длительного хранения установлено (табл. 3), что в среднем оптимальная концентрация ФПК после как 6-летнего, так и 12-летнего хранения достигает от 10 до 0,05 мг/дм³. Наибольшая длина корней отмечена для образцов ФПК после 12-летнего хранения и составила 2,4–3,2 см, длина проростков – 1,29–0,85 см; для ФПК после 6-летнего хранения длина корней в среднем составила 2,4–2,8 см, длина проростков – 0,66–1,22 см. Согласно рассчитанному ИТФ можно отметить, что ФПС вне зависимости от срока хранения имели либо IV класс (низкая токсичность), либо V класс (т. е. не оказывали никакого эффекта на тест-растения). При этом энергия прорастания ФПК после 6-летнего хранения превышала значения в 1,12–1,16 раза.

Таблица 3. Исследование токсичности фульвоподобных соединений после 6- и 12-летнего хранения при различных концентрациях

Table 3. Toxicity study of fulvic-like compounds after 6 and 12 years of storage at different concentrations

Образец	Концентрация, мг/дм ³	Энергия прорастания, %	Длина, см		Биомасса надземной части, г	Т ₀ /Т _к			Класс опасности по ИТФ
			корней	проростков		корневой части	надземной части	биомассы	
Контроль	–	80	2,98 ± 0,89	1,27 ± 0,33	1,95	–	–	–	–
ФПС после 12-летнего хранения	1000	46,6	2,40 ± 0,42	0,90 ± 0,12	1,63	0,805	0,708	0,835	IV
	250	60	2,70 ± 1,06	0,85 ± 0,47	1,76	0,906	0,669	0,902	IV
	100	60	3,20 ± 0,07	0,96 ± 0,05	1,43	1,073	0,755	0,733	IV
	10	62	2,80 ± 0,83	1,17 ± 0,02	1,43	0,939	0,921	0,733	V
	0,1	60	2,75 ± 0,21	0,95 ± 0,07	1,85	0,923	0,748	0,969	V
	0,05	62	2,75 ± 0,08	0,87 ± 0,28	1,95	0,922	0,685	1,000	V
ФПС после 6-летнего хранения	1000	60	2,77 ± 0,07	0,94 ± 0,04	1,45	0,929	0,740	0,743	IV
	250	60	2,73 ± 0,44	0,98 ± 0,08	1,74	0,916	0,771	0,892	IV
	100	60	2,60 ± 0,22	0,66 ± 0,20	1,63	0,872	0,519	0,835	IV
	10	60	2,74 ± 0,20	0,79 ± 0,08	1,80	0,919	0,622	0,923	V
	0,1	73	2,71 ± 0,10	1,20 ± 0,38	1,31	0,910	0,944	0,671	V
	0,05	80	2,72 ± 1,40	1,22 ± 0,09	0,93	0,912	0,960	0,476	V

Закключение. В результате проведенных исследований по изучению фитотоксических свойств ФПК в зависимости от типа торфа и срока хранения ранее наработанных ФПК выявлено, что препараты, полученные из верхового торфа, обладают стимуляционным эффектом, в то время как низинный торф не демонстрирует подобной активности. Установлено, что оптимальная концентрация ФПК для семян редьки после как 6-летнего, так и 12-летнего хранения составляет от 10 до 0,05 мг/дм³. В результате сохранность сухих препаратов не коррелирует с их фитотоксичностью. Будущие исследования в этом направлении откроют возможности для применения в сельском хозяйстве и фиторемедиации загрязненных территорий.

Список использованных источников

1. Афиногенова, С. Н. Применение гуминовых удобрений в растениеводстве / С. Н. Афиногенова, О. В. Черкасов // Научные инновации – аграрному производству : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Омск, 21 февр. 2018 г. / Омский гос. агр. ун-т им. П. А. Столыпина ; редкол.: А. А. Гайвас (гл. ред.). – Омск, 2018. – С. 51–52.
2. Маркина, Е. О. Влияние промышленных гуминовых веществ на свойства почв / Е. О. Маркина, Н. В. Сырчина // Экология родного края: проблемы и пути их решения : материалы XII Всерос. науч.-практ. конф., Киров, 13–14 апр. 2017 г. / Вятский гос. ун-т ; редкол.: С. В. Дегтева (гл. ред.) [и др.]. – Киров, 2017. – С. 46–49.
3. Станюта, Д. Торфяная промышленность – в поисках баланса экономических интересов и экологических факторов / Д. Станюта // Энергоэффективность. – 2013. – № 11. – С. 16–21.
4. Пантелей, К. С. Исследование фильтрации жидкостей в торфе, осложненной осмотическими явлениями : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 314 / К. С. Пантелей ; Калининский политехн. ин-т. – Калинин, 1970. – 28 с.
5. Esringü, A. Remediation of Pb and Cd polluted soils with fulvic acid / A. Esringü, M. Turan, A. Cangönül // Forests. – 2021. – Vol. 12, № 11. – P. 1–13.
6. Применение фитотестирования для решения задач экологического почвоведения / В. А. Терехова, Л. П. Воронина, О. В. Николаева [и др.] // Использование и охрана природных ресурсов в России. – 2016. – № 3. – С. 37–41.
7. Методология биодиагностики почв и особенности некоторых методов биоиндикации и биотестирования (обзор) / В. А. Терехова, С. А. Кулачкова, Е. В. Морачевская, А. П. Кирюшина // Вестник Московского университета. Почвоведение. – 2023. – Т. 78, № 2. – С. 1–12.
8. Cojocar, P. Toxicity of soil pollution with petroleum on plant seeds / P. Cojocar, F. Statescu, G. Biali // International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM. – 2019. – Vol. 19, № 3. – P. 1–15.
9. Using sweet sorghum varieties for the phytoremediation of petroleum-contaminated salinized soil: A preliminary study based on pot experiments / D. Ma, J. Xu, J. Zhang [et. al.] // Toxics. – 2023. – Vol. 11, № 3. – P. 1–15.
10. Atanasova, D. Opportunities for overcoming the phytotoxicity of pesticides in wintering oats (*Avena sativa* L.) by application of organic fertilizers / D. Atanasova, V. Manaeva // Journal of mountain agriculture on the Balkans. – 2021. – Vol. 24, № 6. – P. 206–218.
11. Nickel toxicity in Brassica rapa seedlings-Impact on sulfur metabolism and mineral nutrient content / D. H. Prajapati, T. Ausma, De Boer [et. al.] // Journal fur Kulturpflanzen = Journal of Cultivated Plants. – 2020. – Vol. 72, № 9. – P. 473–478.
12. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
13. Бамбалов, Н. Н. Деструкция гуминовых кислот торфа перекисью водорода / Н. Н. Бамбалов, Т. П. Смышник // Весці Акадэміі навук БССР. Сер. хім. навук. – 1986. – С. 75–78.
14. Harper, S. Phytotoxic effects of Al on root growth are confounded in the presence of fulvic and humic acids / S. Harper, N. Menzies // Soil Systems. – 2023. – Vol. 7, № 3. – P. 68–75.
15. Бухаров, А. Ф. Кинетика Прорастания семян. Методы исследования и параметры / А. Ф. Бухаров, Д. Н. Балеев, А. Р. Бухарова // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2017. – Вып. 2. – С. 5–19.

References

1. Afinogenova S. N., Cherkasov O. V. *Primenenie guminovykh udobrenij v rastenievodstve* [Application of humic fertilizers in crop production]. *Nauchnye innovacii – agrarnomu proizvodstvu. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. of the Int. sci.-pract. conf. "Scientific innovations – agrarian production"]. Omsk, 2018, pp. 51–52 (in Russian)
2. Markina E. O., Syrchina N. V. *Vliyanie promyshlennykh guminovykh veshchestv na svojstva pochv* [The influence of industrial humic substances on soil properties]. *Ekologiya rodnogo kraja: problemy i puti ih resheniya. Materialy XII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. of the XII all-Russian sci.-pract. conf. "Ecology of the native land: problems and ways of their solution"]. Kirov, 2017, pp. 46–49 (in Russian)
3. Stanyuta D. *Torfyannaya promyshlennost' – v poiskah balansa ekonomicheskikh interesov i ekologicheskikh faktorov* [The peat industry – in search of a balance between economic interests and environmental factors]. *Energoeffektivnost' = Energy Efficiency*, 2013, no. 11, pp. 16–21 (in Russian)
4. Pantelej K. S. *Issledovanie fil'tracii zhidkostej v torfe, oslozhnennoj osmoticheskimi yavleniyami. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of liquid filtration in peat complicated by osmotic phenomena. PhD abs. of tech. sci.]. Kalinin, 1970, 28 p. (in Russian)
5. Esringü A., Turan M., Cangönül A. Remediation of Pb and Cd polluted soils with fulvic acid. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 11, pp. 1–13.
6. Terekhova V. A., Voronina L. P., Nikolaeva O. V., Bardina T. V., Kalmatskaya O. A., Kiryushina A. P., Uchanov P. V., Kreslavsky V. D., Vasilyeva G. K. *Primenenie fitotestirovaniya dlya resheniya zadach ekologicheskogo pochvovedeniya* [Application of phytotesting to solve problems of ecological soil science]. *Ispol'zovanie i ohrana prirodnih resursov v Rossii = Use and Protection of Natural Resources in Russia*, 2016, no. 3, pp. 37–41. (in Russian)
7. Terekhova V. A., Kulachkova S. A., Morachevskaya E. V., Kiryushina A. P. *Metodologiya biodiagnostiki pochv i osobennosti nekotorykh metodov bioindikacii i biotestirovaniya (obzor)* [Methodology of soil biodiagnosics and features of some methods of bioindication and biotesting (review)]. *Vestnik moskovskogo universiteta. Pochvovedenie = Moscow University Bulletin. Soil Science*, 2023, vol. 78, no. 2, pp. 1–12. (in Russian)

8. Cojocaru P., Statescu F., Biali G. Toxicity of soil pollution with petroleum on plant seeds. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 1–15.
9. Ma D. J. Xu, Zhang J., Ren L., Li J., Zhang Z., Xia J., Xie H., Wu T. Using sweet sorghum varieties for the phyto-remediation of petroleum-contaminated salinized soil: a preliminary study based on pot experiments. *Toxics*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 1–15.
10. Atanasova D., Manaeva V. Opportunities for overcoming the phytotoxicity of pesticides in wintering oats (*Avena sativa* L.) by application of organic fertilizers. *Journal of mountain agriculture on the Balkans*, 2021, vol. 24, no. 6, pp. 206–218.
11. Prajapati D. H., Ausma T., Hawkesford M. J., De Boer J., De Kok L. J. Nickel toxicity in Brassica rapa seedlings- Impact on sulfur metabolism and mineral nutrient content. *Journal fur Kulturpflanzen = Journal of cultivated plants*, 2020, vol. 72, no. 9, pp. 473–478.
12. Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ih opredeleniya* [Basic properties of peat and methods for their determination]. Minsk, Science and Technology Publ., 1975, 320 p. (in Russian)
13. Bambalov N. N., Smychnik T. P. *Destrukciya guminovykh kislot torfa peroksidom vodoroda* [Destruction of humic acids peat with hydrogen peroxide]. *Vesci Akademii navuk BSSR. Seryya himichnyh navuk = Izvestia of the Academy of Sciences of the BSSR. Series of Chemical Sciences*, 1986, no. 3, pp. 75–78. (in Russian)
14. Harper S., Menzies N. Phytotoxic effects of Al on root growth are confounded in the presence of fulvic and humic acids. *Soil Systems*, 2023, vol. 7, no. 3, pp. 68–75.
15. Buharov A. F., Baleev D. N., Buharova A. R. *Kinetika prorastaniya semyan. Metody issledovaniya i parametry* [Kinetics of seed germination. Research methods and parameters]. *Izvestiya Timiryazevskoj sel'skohozyajstvennoj akademii = Izvestiya of the Timiryazev Agricultural Academy*, 2017, iss. 2, pp. 5–19. (in Russian)

Информация об авторах

Янута Юрий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией физико-химической механики природных дисперсных систем, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanuta@tut.by

Шелоник Мария Александровна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: maria.shelonik006@gmail.com

Information about authors

Yuriy G. Yanuta – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Deputy Director, Head of Lab. of physico-chemical mechanics of natural dispersed systems, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanuta@tut.by

Mariya A. Shelonik – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: maria.shelonik006@gmail.com

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-203-213>
УДК 627.8

Поступила в редакцию 18.11.2024
Received 18.11.2024

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. Н. Казимирская, А. В. Лихачева

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье обобщены возможные варианты использования мелкодисперсных железосодержащих отходов производства, к которым относятся окалина, пыль систем очистки, шламы, шлаки и пр. Такие отходы характеризуются разным составом и периодически в небольших количествах образуются на многих предприятиях, что затрудняет их сбор и переработку. Для анализа возможности использования данных отходов в качестве сырьевых материалов проанализированы научные работы, в том числе включенные в базы Scopus и Web of Science. Показано, что разработанные к настоящему времени в зарубежных странах технологии позволяют использовать мелкодисперсные железосодержащие отходы в качестве сырья в различных отраслях промышленности с получением целевых продуктов: кирпича и радиационно-защитных функциональных композитов, бетонных смесей, сорбентов, коагулянтов и пигментов.

Ключевые слова: железосодержащий отход; сырье; переработка; метод; повторное использование.

Для цитирования: Казимирская Е. Н., Лихачева А. В. Использование мелкодисперсных железосодержащих отходов производства в качестве сырьевых материалов // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 203–213.

RECYCLING OF FINE IRON-CONTAINING INDUSTRIAL WASTE AS RAW MATERIALS

E. N. Kazimirskaya, A. V. Likchachova

Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

Abstract. The article summarizes the possible options for the use of fine iron-containing production wastes, which include scale, dust from cleaning systems, sludge, slag and others. Such wastes are characterized by different composition, periodically, in small quantities are formed at many enterprises, which makes it difficult to collect and process them. To analyze the possibility of using these wastes as raw materials, scientific papers, including those included in Scopus and Web of Science databases, have been analyzed. It is shown that the technologies developed to date in foreign countries allow to use fine iron-containing wastes as raw materials in various industries to obtain target products: bricks and radiation-protective functional composites, concrete mixtures, sorbents, coagulants and pigments.

Keywords: iron-containing waste; raw materials; processing; method; recycling.

For citation: Kazimirskaya E. N., Likchachova A. V. Recycling of fine iron-containing industrial waste as raw materials. *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 203–213.

Введение. Одним из приоритетных направлений развития промышленного комплекса Республики Беларусь является наращивание производства металлопродукции, производимой металлургическими и машиностроительными предприятиями.

За последние пять лет в стране отмечается устойчивый рост производства металлопроката и изделий из черных и цветных металлов. Например, годовое производство металлопродукции республиканским унитарным предприятием «Белорусский металлургический завод» составило около 2,3 млн т стали (2023 г.) [1], что составляет 15 % прироста объема производства к уровню прошлого года. Для наращивания темпов экономического развития страны на ближайшую перспективу запланирован дальнейший рост потребления металлопродукции на внутреннем рынке, а также увеличение производства экспортно ориентированной продукции (порядка 60 % производимой продукции реализуется на российском рынке), производимой как Белорусским металлургическим заводом, так и ведущими машиностроительными предприятиями [2].

В то же время анализ структуры экспортно-импортных поставок черных металлов Республики Беларусь показывает, что импортная составляющая постоянно преобладает над экспортной [3]. При этом с ростом производства металлопродукции неуклонно увеличивается количество образующихся отходов. Так, в Республике Беларусь за 2023 г. образовалось 131,41 тыс. т железосодержащих отходов, из которых неиспользованными осталось 25,74 тыс. т (около 20 %) [4]. В данной статье рассмотрены возможные варианты использования образующихся в Республике Беларусь (мелкодисперсных) железосодержащих отходов (ЖСО) в качестве сырьевых материалов.

ЖСО серьезно нарушают производственную среду и приводят к огромной трате ресурсов. Они занимают большие производственные территории, содержат тяжелые металлы и другие токсичные компоненты, которые могут выщелачиваться естественным путем, вызывая загрязнение почвы и воды и влияя на качество окружающей среды [5].

В настоящее время действия в области использования отходов обычно ограничиваются переработкой побочных продуктов, содержащих строго установленный и постоянный состав (переработка лома черных и цветных металлов, сталь в кусковой форме, опилки стальные незагрязненные и др.). Однако неостребованными остаются мелкодисперсные ЖСО, отличающиеся непостоянным составом. Данные отходы образуются в небольшом количестве на различных стадиях обработки металлических изделий и не только, что затрудняет их сбор. Поэтому эти отходы хранятся на территории предприятий, на которых они образовались, и (или) вывозятся на захоронение на полигоны твердых коммунальных отходов, а ценные компоненты, содержащиеся в отходах, остаются неиспользованными.

Развитие промышленных предприятий и наращивание темпов производства приводят к тому, что, с одной стороны, с каждым годом количество невозвратных металлсодержащих отходов (в том числе мелкодисперсных) увеличивается на десятки тысяч тонн [6], а с другой стороны, быстрая индустриализация увеличивает спрос на металлы. В связи с этим остро встает вопрос изучения альтернативных источников металлов, в том числе способов максимально эффективного использования промышленных отходов, содержащих ценные компоненты.

Проведенные ранее сравнения составов отходов и природного сырья, рассматриваемые в статье [7], показали, что мелкодисперсные металлсодержащие отходы (ММСО) характеризуются более высокой влажностью (в среднем 70–90 %) и совместным присутствием в них соединений меди, никеля, цинка и хрома, которое в природном сырье не встречается. Однако при этом содержание основных элементов в шламах и осадках изменяется в широких пределах и может достигать до 74 %, что значительно выше, чем в руде, используемой в качестве сырья для получения металлов.

Таким образом, многие виды ММСО можно рассматривать как вторичное сырье, грамотное использование которого позволит не только окупить затраты на его сбор и переработку и снизить воздействие на компоненты окружающей среды, но и получить значительную прибыль [7].

Изучение научных публикаций показывает, что исследователи во всем мире успешно находят пути решения сложившейся ситуации [8–26]. Однако свойства отходов очень многообразны, как и процессы их образования, приводящие к изменениям этих свойств и структуры. Это накладывает многочисленные ограничения на применимость конкретных методов и методик, показывает практическую невозможность создания универсальной технологии переработки металлсодержащих отходов. Зачастую извлечение или обработка отходов для дальнейшего использования по своей стоимости превышает затраты на получение металлов или материалов из природного сырья.

Существует несколько принципиально разных способов обращения с ММСО. Большая их часть подлежит хранению на территории предприятий и захоронению на полигонах. Главная причина такого подхода заключается в трудноизвлекаемости ценных компонентов, непостоянстве состава и экономической нецелесообразности, обусловленной тем фактом, что подобного рода отходы образуются в малом количестве на большинстве предприятий республики, затрудняя их сбор и переработку. В связи с этим в настоящее время весьма перспективными являются исследования, направленные на разработку методов, позволяющих наиболее полно извлекать металлы из отходов производства, что позволит нивелировать затраты, связанные со сбором и транспортировкой отходов на место их переработки. Перерабатывая ММСО, предприятия тем самым будут минимизировать их неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

Методы переработки металлсодержащих отходов условно можно классифицировать по возможности их использования:

- извлечение ценных компонентов из отходов либо в чистом виде, либо в результате перевода их в другие соединения, составляющие основу готовых продуктов;
- использование «как есть» (в виде добавок к различным материалам) и использование продукта для хозяйственных нужд;
- восстановление металлсодержащих соединений с получением шихтовых материалов.

Цель работы – изучить мировой опыт переработки ММСО, в частности ЖСО, которые на данный момент не имеют практически реализованных вариантов использования в Республике Беларусь.

Данные и методы исследования. Обзор основан на анализе научных работ, в том числе включенных в базы Scopus и Web of Science. Поиск осуществлен по ключевым словам и фразам: «переработка отходов», «переработка промышленных отходов», «переработка железосодержащих отходов». Предпочтение отдано работам, опубликованным в течение последних пяти лет (2019–2024 гг.), либо наиболее значительным трудам в исследуемой области.

Результаты и их обсуждение. На основе анализа научных работ составлена схема способов возможной переработки ЖСО (рис. 1).

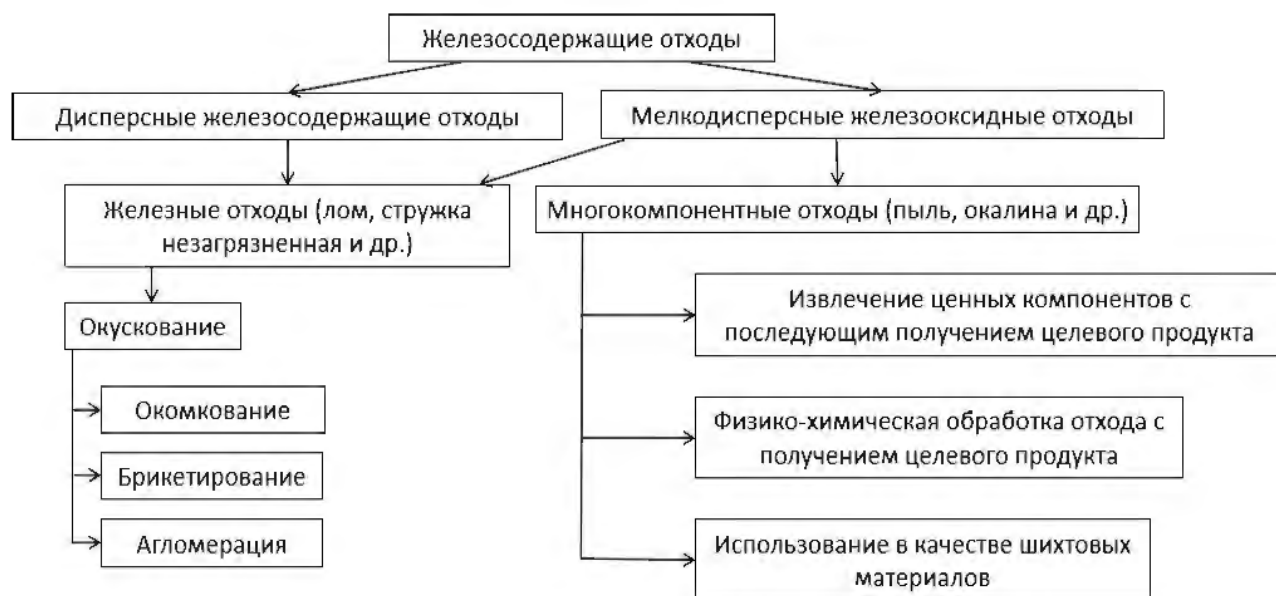


Рис. 1. Способы переработки железосодержащего сырья

Fig. 1. Methods for processing iron-containing raw materials

Стоит отметить, что некоторые из рассмотренных способов (см. рис. 1) могут быть применены для переработки мелкодисперсных ЖСО, характеризующихся непостоянным составом.

Использование альтернативных сырьевых ресурсов, представленных мелкими (менее 10 мм) частицами отходов (ЖСО первой категории), малоэффективно или затруднительно, поэтому предварительная подготовка их к переработке предусматривает окускование.

В зависимости от вида частиц окускование осуществляется агломерацией, окомкованием или брикетированием.

В результате окускования частиц получают:

- при агломерации – агломерат крупностью 5–40 мм [27];
- при окомковании – окатыши крупностью в основном 5–14 мм [27];
- при брикетировании – брикеты разной геометрической формы, необходимых габаритов и массы.

Из общего объема производства окускованного сырья большую часть (порядка 70 %) составляет агломерат.

Подготовленные вышеуказанным образом ЖСО используются в качестве сырья при производстве продукции металлургической промышленности.

Ко второй категории относятся дисперсные и мелкодисперсные железосодержащие многокомпонентные отходы, менее ценные материалы с точки зрения использования их в качестве шихтовых: окалина, аспирационная пыль, шламы и т. п. Содержание железа ($Fe_{общ.}$) в таких отходах, как правило, не превышает 70 %, а доля оксидов или других соединений металлов (карбидов, нитридов, сульфидов, сложных минералов и т. п.) составляет от 10 до 100 %, причем в них, как правило, одновременно присутствуют соединения целой группы металлов и неметаллов. Эта категория материалов до настоящего времени остается практически невостребованной.

Таким образом, объектом исследования в статье является изучение способов переработки ЖСО второй категории.

ЖСО, представляющие собой оксидные материалы, к которым относятся окалина, пыль систем очистки, шламы и другие материалы, переработка которых затруднена ввиду их загрязненности и меньшего содержания железа в сравнении с концентрированным металлургическим сырьем, могут быть использованы в качестве сырьевых ресурсов.

В таблице приведен сравнительный анализ состава минеральных руд и металлосодержащих отходов по содержанию и них железа общего.

Сравнительный анализ состава железосодержащих минералов и отходов**Comparative analysis of the composition of iron-containing minerals and waste**

Минерал			Отход	
Название	Содержание железа, %	Ценность минерала по содержанию железа	Название	Содержание железа, %
Магнетит [28]	72,4	Богатые (>60 %)	Электросталеплавильный шлам [29]	30,0–55,0
Железистые кварциты [28]	25,6	Бедные (<40 %)	Шлам индукционной печи [29]	31,0
Магномагнетит [28]	65,0–68,0	Богатые (>60 %)	Пыль газоочисток электросталеплавильных печей [30]	32,7–35,2
Титаномагнетит [28]	55,0–67,0	Богатые (>60 %)	Шлам мокрого пылеулавливания при очистке вентиляционных выбросов [30]	33,9–38,7
Гематит [28]	70,0	Богатые (>60 %)	Окалина [31]	69,0–73,0
Гетит [28]	62,9	Богатые (>60 %)	Пыль аспирационная [31]	59,0
Лимонит [28]	52,0–62,9	Средние (40–60 %)	Пыль металлическая горячей и холодной резки проката [31]	60,8
Сидерит [28]	48,3	Средние (40–60 %)		

Основным способом переработки ЖСО является их использование в качестве шихтовой добавки при производстве бетоносмесей, керамических изделий и других композиционных материалов.

Так, целью работы [8] являлось исследование возможности включения хвостов, образующихся при обогащении железной руды (железорудных хвостов), в качестве заполнителя в холодные асфальтобетонные смеси. Аналоговым отходом, образующимся на территории Республики Беларусь и не используемым на данный момент, можно рассматривать 3510201 «Смесь окалина и сварочного шлака».

Уход за асфальтовым покрытием требует большого количества материалов, и с экологической точки зрения очень важно пытаться искать альтернативные материалы, улучшающие механические качества дорожного покрытия. Установлено, что в качестве таких компонентов целесообразно использовать материалы, характеризующиеся микроповерхностью. К таковым могут быть отнесены некоторые ЖСО.

Железорудные хвосты, проанализированные в работе [8], состояли из таких минералов, как кварц и гематит. Песчаный гранулированный материал был включен в качестве измельченного заполнителя, в то время как железорудные хвосты были добавлены в качестве частичной замены мелких природных заполнителей (щебня, гравия, кварцевого песка).

Результаты показали, что смеси, содержащие железорудные хвосты, соответствуют требованиям, предъявляемым к качеству материалов, используемых для строительства автомобильных дорог. С экологической точки зрения, потенциальное использование мелкодисперсных ЖСО снижает потребление природных ресурсов и позволяет получать асфальтобетонные смеси, по качеству не уступающие холодным смесям.

Еще одним альтернативным сырьем, используемым в качестве добавки к бетоносмесям, являются железные опилки, которые считаются отходами, образующимися в процессе металлообработки в виде мелкого порошка. Аналоговым отходом, образующимся на территории Республики Беларусь и не используемым на данный момент, можно рассматривать 3510806 «Металлоотходы (куски, крошка, стружка, высечка и т. п.) при обработке проката черных металлов».

В исследовании [9] железные опилки использовали для определения их пригодности в качестве мелкодисперсного заполнителя при производстве бетона. Замена всех или части мелких заполнителей железными опилками приводит к значительным экологическим преимуществам, так как позволяет решить проблему нехватки заполнителей при производстве бетоносмесей, используемых на различных строительных площадках, и уменьшая экологические проблемы, связанные с накоплением этих материалов на территории предприятий металлообработки.

В работе [10] показано, что из мелкодисперсных ЖСО можно получить жаростойкий бетон, который в дальнейшем можно применять в качестве огнеупора. Для получения жаростойкого бетона использовали следующие техногенные сырьевые материалы: в качестве химического связующего – ортофосфорную кислоту H_3PO_4 ; в качестве кальцийсодержащего компонента – ферропыль из самораспадающихся шлаков низкоуглеродистого феррохрома; в качестве алюмосодержащего компонента – шлак от выплавки безуглеродистого феррохрома; в качестве железосодержащего компонента – феррит-кальциевый шлак [10]. Аналоговым отходом, образующимся на территории Республики Беларусь

и не используемым на данный момент, можно рассматривать 3990102 «Шлаки сталеплавильные специальные синтетические известково-глиноземистые отработанные». Благодаря использованию ортофосфорной кислоты в качестве связующего автору удалось утилизировать до 85 % техногенного сырья и получить жаростойкие композиты (бетоны) с высокими физико-механическими показателями, что способствовало утилизации промышленных отходов, охране окружающей среды и расширению сырьевой базы для получения жаростойких бетонов на основе фосфатных связующих.

Также ЖСО могут успешно применяться в качестве шихтовой добавки при производстве керамических изделий. В работах [11, 12] исследования посвящены получению кирпича из богатых железом металлургических отходов, включающих медный шлак, прокатную окалину, пыль и железные хвосты, образующиеся при измельчении черных металлов и обогащении полезных ископаемых. Аналогичными отходами, образующимися на территории Республики Беларусь и не используемыми на данный момент, можно рассматривать 3550600 «Шлам медный», 3510202 «Окалина от зачистки закалочных баков», 3510201 «Смесь окалины и сварочного шлака». Проведены различные испытания для изучения физико-механических характеристик, прочности и выщелачивания тяжелых металлов из полученного кирпича. Результаты показывают повышенную пористость и потери при обжиге образцов кирпича при увеличении дозирования отходов. Однако снижение кажущейся пористости и потерь при обжиге образцов кирпича наблюдается при увеличении дозирования прокатной окалины и пыли черных металлов. Все образцы кирпича, содержащие отходы металлургического производства, соответствуют требованиям к прочности на сжатие и водопоглощению.

Другим перспективным направлением переработки ЖСО является получение на их основе радиационно-защитных функциональных композитов (РЗФК) [13]. Это направление особенно актуально для Республики Беларусь ввиду развития в нашей стране атомной энергетики и, как следствие, необходимости изоляции радиационно загрязненных отходов.

В исследовании [13] предложена новая технология получения низкоуглеродистых РЗФК с включением богатых железом промышленных отходов в качестве прекурсоров и тяжелых заполнителей. Анализ исследуемых свойств такого отхода, как стальной шлак, показал, что щелочно-активные компоненты, находящиеся в составе промышленного отхода, вступают в реакцию со щелочью-активатором с образованием большого количества геополимерных гелей, а это приводит к улучшению межфазной переходной зоны. Аналогичным отходом, образующимся на территории Республики Беларусь и не используемым на данный момент, можно рассматривать 3990102 «Шлаки сталеплавильные специальные синтетические известково-глиноземистые отработанные». Выявлено, что экранирующие свойства гамма-излучения получаемых РЗФК на 21,2 % лучше, чем у обычного композита, что обусловлено высокой плотностью заполнителей из промышленных отходов и плотной микроструктурой РЗФК. При этом выбросы диоксида углерода и энергопотребление при получении композитов снижены на 64,4 % за счет замены природных тяжелых заполнителей промышленными отходами. Таким образом, указанное новое решение является перспективным способом по переработке промышленных отходов, тем самым способствуя переходу экономики страны к экономике замкнутого цикла.

Стоит отметить, что после предварительной обработки ЖСО возможно их использование в качестве шихтового материала. Переработка твердых отходов, таких как железосодержащая пыль, в окатыши является важным этапом в обращении с этими материалами, поскольку полученные окатыши могут быть использованы в качестве вторичных железосодержащих источников в процессе производства сплавов чистых металлов. Для реализации процесса применяют разное оборудование (вагранки, тигельные печи, дуговые печи постоянного тока, установки электрошлакового переплава и др.), но наиболее эффективным способом переработки сильноокисленных металлоотходов, согласно [14], является применение ротационных печей. Так, в исследовании [15] предложена технология переработки железосодержащей пыли в окатыши с использованием подобного оборудования – вращающейся печи. Аналогичными отходами, образующимися на территории Республики Беларусь и не используемыми на данный момент, можно рассматривать 3510104 «Железосодержащая пыль окатышей» и 3510106 «Пыль железосодержащая с дробью».

Использование вращающейся печи представляет собой пирометаллургический метод переработки, который может быть использован для получения окатышей (металлического железа) из оксидов железа с попутным удалением таких элементов, как Zn, Pb, K и Na, что позволяет перерабатывать указанные материалы.

Кроме того, существует альтернативный метод, предусматривающий совместно с биоуглем (отход производства энергии) восстановление железа окисленного, содержащегося в таком отходе, как агломерационная пыль до железа металлического. Аналогичным отходом, образующимся на территории Республики Беларусь и не используемым на данный момент, можно рассматривать 3510104 «Железосодержащая пыль окатышей». Железосодержащая пыль, пыль окатышей, пыль железосодержащая с дробью и т. д. (железосодержащая пыль), представляют собой твердые отходы, содержащие железо, которые серьезно нарушают производственную среду и приводят к огромной трате ресурсов. Однако частицы пыли, как правило, имеют довольно мелкий размер, что затрудняет переработку данного отхода. Учитывая эту особенность, в исследовании [16] предлагается получать железо

прямого восстановления (железный порошок высокой чистоты) с использованием такой мелкозернистой пыли, что позволит достичь экономических, технических и экологических преимуществ.

После физико-химической обработки ЖСО их можно использовать в качестве целевого продукта. Так, в работе [17] предлагается использовать железный шлам для получения магнитных фотокатализаторов. Аналоговыми отходами, образующимися на территории Республики Беларусь и не используемыми на данный момент, можно рассматривать 3550200 «Шлам металлошлифовальный», 3551200 «Шламы сталелитейные», 3551800 «Шлам железосодержащий».

Магнитные фотокатализаторы представляют собой особый тип фотокатализаторов, наполненных магнитными материалами, такими как Fe, Co, Ni и т. д. Однако приготовление магнитных фотокатализаторов, как правило, требует использования добавок и проведения дополнительных процедур, что приводит к значительному увеличению затрат на подготовку. В работе [17] магнитные фотокатализаторы получали методом пиролиза с использованием железного шлама без каких-либо добавок. Эффективность получаемых фотокатализаторов оценивали на предмет деградации тетрациклина, при этом максимальная эффективность деградации в течение 5 ч составила 95,3 % при концентрации тетрациклина 10 мг/дм³ (pH = 7,0). Были изучены морфология, состав, структура и фотоэлектрические свойства полученных фотокатализаторов. Проведенные в работе [17] исследования открывают новые возможности для повторного использования железосодержащих шламов.

Еще одним примером использования ЖСО в качестве катализаторов является их применение в процессе Анаммокса [18]. Технологии типа Анаммокс основаны на двух самостоятельных микробиологических процессах: частичной нитрификации, которая включает окисление половины содержащегося в сточных водах аммония до нитрита, и анаэробном окислении аммония нитритом до молекулярного азота.

В исследовании [18] была продемонстрирована возможность использования отходов железа в качестве катализаторов. Перед использованием оксидное железо предварительно восстанавливали до металлического, что обеспечивало увеличение эффективности удаления азота на 15–35 % по сравнению с контрольным образцом, в котором катализатор не использовали. Аналоговым отходом, образующимся на территории Республики Беларусь и не используемым на данный момент, можно рассматривать 3510202 «Окалина от зачистки закалочных баков».

Осуществление процесса Анаммокса с использованием в качестве катализаторов восстановленных ЖСО позволит одновременно обеспечить энергоэффективное удаление азота из сточных вод и повторное использование ЖСО как ценного ресурса.

В случаях когда использование непосредственно ЖСО невозможно по техническим или экономическим показателям, данные отходы можно использовать в качестве источников железа. Значит, предварительно извлеченное из данных отходов железо подлежит использованию для получения целевого продукта. Примерами подобного рода целевых продуктов могут служить пигменты, коагулянты, сорбенты и др. Так, в работе [19] предлагается использовать ЖСО производства титановых белил для получения аккумуляторного фосфата железа (III).

Извлечение железа из побочного продукта сульфата железа для получения аккумуляторного фосфата железа (III) представляет собой перспективный подход к решению проблемы утилизации отходов, одновременно обеспечивая прекурсор для новых энергетических батарей. Кроме того, железный купорос также возможно использовать в производстве желтых и красных железосодержащих пигментов и как коагулянт при очистке водопроводной воды. Избыток купороса также можно прокаливать с известью и получать таким образом «окатыши» – сырье для выплавки чугуна в вагранках, индукционных печах и др. Аналоговым отходом, образующимся на территории Республики Беларусь и не используемым на данный момент, можно рассматривать 5152000 «Сульфат железа (зеленая соль)».

Альтернативным способом использования извлеченного из отходов железа общего является получение на его основе сорбентов. В работе [20] с помощью модифицированного метода Массара из железной окалины получены магнитные сорбенты для удаления ионов тяжелых металлов и органических загрязнителей из сточных вод. В качестве сырья для получения магнитных сорбентов использована окалина от зачистки закалочных баков, которой в 2023 г. в Республике Беларусь образовалось 530 т. При этом данный отход не используется, что приводит к его накоплению на промышленных территориях предприятий.

Полученные в лабораторных условиях магнитные сорбенты обладали заданными магнитными свойствами, что позволяло управлять и контролировать их нахождение в обрабатываемой среде. Исследования показали, что полученные магнитные сорбенты отличались более чистым составом в сравнении с используемым для их получения отходом, и представляли собой частицы магнетита. Полученные сорбенты показали сравнительно высокие значения сорбционной емкости по отношению к тяжелым металлам (Cu, Mn, Fe), а также по отношению к метиленовому голубому. Кроме того, в работе [20] представлен механизм сорбции загрязняющих веществ полученными сорбентами. Проведенные исследования подтверждают, что данный способ переработки ЖСО служит перспективным направлением их использования, а сами отходы являются ценным сырьем.

Другим примером получения сорбентов на основе ЖСО является работа [21], в которой отходы стальной пыли двух разных сталелитейных заводов использовали для обеззараживания воды. В качестве модельного загрязнителя применяли анионный краситель эриохром черный Т (ЭЧТ). Частицы стальной пыли показали высокое сродство к красителю ЭЧТ (100%-е удаление) при $\text{pH} = 2,0$ и концентрации красителя 20 мг/дм^3 . Кинетические данные были лучше описаны моделью псевдовторного порядка, указывающей на хемосорбционные взаимодействия. Результаты изотерм показали хорошее соответствие модели изотермы Ленгмюра, предполагающей адсорбцию ЭЧТ на частицах стальной пыли в монослой. Максимальная адсорбционная емкость составила $100,2 \text{ мг/г}$. Исследования показали, что частицы стальной пыли могут быть напрямую использованы в качестве потенциально недорогого и перерабатываемого адсорбирующего материала для очистки водных потоков, загрязненных красителем. В качестве аналоговых отходов можно рассматривать 3510104 «Железосодержащая пыль окатышей» и 3510106 «Пыль железосодержащая с дробью».

Также известен способ синтеза магнитных сорбентов, представляющих собой магнитные цеолиты, полученные из летучей золы и ЖСО в сверхкритической воде для удаления элементарной ртути из дымовых газов [22]. Цеолитизация летучей золы приводит к образованию более активных центров галогенов на поверхности материалов. Основной кристаллической фазой синтетического магнитного цеолита является канкринит ($\text{Na}_6\text{Ca}[\text{CO}_3(\text{AlSiO}_4)_6] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). В качестве аналогового отхода можно рассматривать 3510203 «Смесь окалина и сварочного шлака».

Другим продуктом, получаемым из извлеченного из отходов железа, являются коагулянты. Данные соединения применяются в практике очистки сточных вод при процессах осветления и обесцвечивания.

Стружка стальная, загрязненная органическими веществами, является опасным отходом, который сложно перерабатывать из-за высокого содержания смазочно-охлаждающих жидкостей в составе отхода, и сегодня его обычно отправляют для захоронения на полигоны или складывают в несанкционированных местах (свалках). В качестве аналоговых отходов можно рассматривать 3510801 «Металлоотходы (обрезь, немерные концы, недокат, стружка и т. д.) обработки проката», 3552903 «Шлам стали в смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ)». Стружка может содержать до 80 % железа и представляет собой потенциальное вторичное сырье для производства реагентов, таких как хлорид железа (III) и др., которые могут быть использованы для очистки сточных вод. В работе [23] представлен новый гидрометаллургический подход к переработке стальной стружки с получением хлорида железа (III) путем селективного отделения железа от других тяжелых металлов, входящих в состав отхода. Целью данной работы являлось достижение селективного отделения металлов от смазочно-охлаждающей жидкости и абразивов путем выщелачивания. Результаты показали, что растворы хлорида железа (III) чистотой 99 % могут быть получены из стальной стружки за одну стадию выщелачивания.

Полученные растворы хлорида железа (FeCl_3) являются товарным продуктом и могут использоваться в качестве коагулянтов при очистке природных и сточных вод. Благодаря альтернативному применению стружки повышается ее потенциальная ценность. Это способствует вторичной переработке отхода, делает его захоронение менее привлекательным и таким образом обеспечивает более рациональное обращение с данным отходом.

Также когулянты получали из шлама шлифовального [24]. В качестве аналоговых отходов можно рассматривать 3550200 «Шлам металлошлифовальный и шлам, загрязненный смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ)» и 3552903 «Шлам стали в смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ)». Коагулянт получали путем обработки шлифовального шлама серной кислотой. Особенность предлагаемого в данной работе метода заключалась в постадийном добавлении серной кислоты, что привело к увеличению выхода целевого продукта, кристаллического сульфата железа. Образующийся в процессе получения коагулянта сернокислый маточный раствор и промывные воды авторы предлагают использовать для собственных нужд очистных сооружений, связанных с обезвреживанием эмульсионных сточных вод и восстановлением хромосодержащих сточных вод.

Кроме коагулянтов и сорбентов, получаемых из извлеченного из отходов железа, также получают пигменты. В работе [25] авторы предлагают получать красные пигменты из железного купороса. При этом получают пигменты с требуемыми свойствами, а также побочный продукт – сульфат натрия, который предлагают использовать в качестве удобрения в сельском хозяйстве. В работе [26] показано, что для получения красного пигмента могут быть использованы такие мелкодисперсные ЖСО, как окалина, шлам и скрап. Однако объектом исследований в указанной работе выступает сталеплавильный шлак, который также может быть использован в качестве сырья для получения пигментов, применяемых в строительной промышленности.

Как видно из обзора, возврат в производство мелкодисперсных ЖСО полностью зависит от их начального состава и способа последующей обработки. Комбинируя различные методы, можно комплексно подойти к переработке отходов различных классов, а также смешанных отходов, получая на их основе материалы, востребованные в различных отраслях промышленности (рис. 2).

В большинстве случаев, используя современные методы переработки отходов, можно обеспечить полное обезвреживание и многократное использование в технологических процессах ценных ресурсов, которые сейчас хранят на территории предприятий или захоранивают на полигонах.



Рис. 2. Область применения материалов, полученных из железосодержащих отходов производства

Fig. 2. The scope of application of materials obtained from fine iron-containing wastes

Закключение. Приведенные результаты изучения научных публикаций показывают, что мелко-дисперсные ЖСО, представляющие собой оксидные материалы, к которым относятся окалина, пыль систем очистки, шламы и прочие, могут быть использованы в качестве сырья в различных отраслях промышленности с получением целевых продуктов:

- 1) кирпича и РЗФК;
- 2) бетонных смесей;
- 3) сорбентов;
- 4) коагулянтов;
- 5) пигментов.

Проведенный анализ показал, что переработка ЖСО является перспективным направлением их использования в качестве ценного сырья для различных отраслей промышленности как Республики Беларусь, так и других стран. Совершенствование системы обращения с ними будет способствовать переходу экономики страны к замкнутому циклу.

Список использованных источников

1. Белорусский МЗ по итогам 2023 года увеличит выпуск стали на 15 % // Металлургический бюллетень. – URL: <https://www.metalbulletin.ru/news/black/10176405/> (дата обращения: 29.10.2024).
2. Освоение и разработка новых видов продукции. БМЗ об основных задачах на 2025 год // Интернет-портал BELTA.BY. – URL: <https://belta.by/economics/view/osvoenie-i-razrabotka-novyh-vidov-produktsii-bmz-ob-osnovnyh-zadachah-na-2025-god-690444-2025/?ysclid=m8e8hr9tjp860647906> (дата обращения: 18.03.2025).
3. Внешняя торговля товарами // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/vneshnyaya-torgovlya/vneshnyaya-torgovlya-tovarami/> (дата обращения: 18.03.2025).
4. Отходы // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayushchaya-sreda/sovmestnaya-sistema-ekologicheskoi-informatsii2/i-othody/> (дата обращения: 29.10.2024).
5. Туктарова, И. О. Анализ существующих методологических подходов к проблеме установления границ почвенного загрязнения основными поллютантами и металлсодержащими наночастицами в районах расположения несанкционированных свалок / И. О. Туктарова, Р. А. Болотов // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Т. 13, № 3. – С. 193–200. – URL: https://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-3-2021/193-200.pdf (дата обращения: 18.03.2025).
6. Наличие, образование и движение отходов по видам экономической деятельности // Экологический портал Республики Беларусь. – URL: <https://ecoportal.gov.by/otkhody/nalichie-obrazovanie-i-dvizhenie-otkhodov/otkhody-po-vidam-ekonomicheskoy-deyatelnosti/> (дата обращения: 17.05.2025).
7. Элементный и фазовый состав гальванических шламов, осадков очистных сооружений машиностроительных и приборостроительных предприятий Республики Беларусь / В. Н. Марцуль, А. В. Лихачева, О. С. Залыгина [и др.] // Природные ресурсы. – 2013. – № 1. – С. 113–118.

8. Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures / R. Freddy, A. Guimarães, A. Vivoni, R. Schroder // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 266. – Part B. – P. 57–65.
9. Rotary hearth furnace for steel solid waste recycling: Mathematical modeling and surrogate-based optimization using industrial-scale yearly operational data / J. Kim, M. Cho, M. Jung [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 464. – P. 125–133.
10. Абдрахимов, В. З. Использование металлургических кальций-, алюминий- и железосодержащих шлаков в производстве жаростойкого бетона на основе ортофосфорной кислоты / В. З. Абдрахимов // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 82–95.
11. Recycling of metallurgical wastes in ceramics: A sustainable approach / Y. Er, M. Sutcu, O. Gencel [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 349. – P. 45–52.
12. Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity / R. Li, Y. Zhou, C. Li [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 213. – P. 43–50.
13. Iron-rich industrial waste enhanced low-carbon radiation shielding functional composites / Y. Xia, D. Shi, R. Zhao [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – Vol. 449. – P. 97–104.
14. Ровин, С. Л. Конструктивные особенности ротационных печей / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2020. – № 4. – С. 49–59.
15. Novel approach to recycling of steel swarf using hydrometallurgy / T. Ottink, N. Viecei, M. Foreman, M. Petranikova // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2022. – Vol. 185. – P. 235–241.
16. Synergistic conversion of iron ore sintering dust and waste biochar to produce direct reduction iron and syngas: Gasification, reduction behavior and thermodynamic analysis / L. Wang, Y. Yang, Y. Ou [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – Vol. 434. – P. 27–31.
17. Self-endowed magnetic photocatalysts derived from iron-rich sludge and its recycling in photocatalytic process for tetracycline degradation / X. Liu, H. Wang, Ch. Wang [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2024. – Vol. 395. – P. 146–151.
18. A new concept of waste iron recycling for the enhancement of the anammox process / W. Liu, T. Li, J. Wang [et al.] // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 307. – Part 4. – P. 78–86.
19. Extraction of iron from waste titanium whitewash to produce LiFePO₄ batteries / Y. Jiang, C. Peng, K. Zhou [et al.] // *Clean Production*. – 2023. – Vol. 415. – P. 137–145.
20. Казимирская, Е. Н. Железосодержащие отходы как вторичный материальный ресурс / Е. Н. Казимирская, А. В. Лихачева // Импортзамещение, научно-техническая и экономическая безопасность : сб. ст. V Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения – 2022». – Минск : БГТУ, 2022. – Т. 1. – С. 157–161.
21. Comparative adsorption of Eriochrome black T onto recyclable steel dust wastes: Isotherm, kinetics and thermodynamic studies / M. Manzar, M. Alshabib, U. Alam [et al.] // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2022. – Vol. 645. – P. 59–65.
22. Rapid synthesis of magnetic zeolite materials from fly ash and iron-containing wastes using supercritical water for elemental mercury removal from flue gas / L. Ma, L. Han, Sh. Chen [et al.] // *Fuel Processing Technology*. – 2019. – Vol. 189. – P. 39–48.
23. A novel recycling and reuse method of iron scraps from machining process / P. Li, X. Li, F. Li // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 266. – P. 79–85.
24. Соколов, Л. И. Получение железосодержащего коагулянта из отходов шлифовального производства / Л. И. Соколов, К. Л. Соколов // Системные технологии. – 2023. – Т. 4, № 49. – С. 154–160.
25. Шаматов, С. А. Получение сульфата натрия и железоксидного пигмента на основе железного купороса / С. А. Шаматов, И. У. Рахманов // *Scientific Journal Impact Factor*. – 2021. – Vol. 1, № 4. – P. 1478–1482.
26. Рузавин, А. А. Синтез красного железоксидного пигмента на основе конвертерного сталеплавильного шлака для строительной индустрии / А. А. Рузавин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 19–27.
27. Металлургия чугуна : учеб. для вузов / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев [и др.] ; под ред. Ю. С. Юфина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Академкнига, 2004. – 774 с.
28. Классификация железных руд // Горнодобывающий ресурс России «Rosmining». – URL: <https://rosmining.ru/wp-content/uploads/2022/05/-zheleznyh-rud-.pdf?ysclid=m9jr9njtom735205766> (дата обращения: 16.04.2025).
29. Урбанович, Н. И. Анализ состава и технологий переработки дисперсных железосодержащих отходов / Н. И. Урбанович, С. В. Корнеев // *Литье и металлургия*. – 2021. – № 4. – С. 66–69.
30. Переработка железосодержащих пылевидных отходов металлургического производства в пигмент для окраски строительных материалов / В. Б. Федосеев, А. Д. Зорин, Е. Н. Федосеева [и др.] // *Бутлеровские сообщения*. – 2013. – Т. 42, № 9. – С. 94–102.
31. Ровин, С. Л. Классификация и свойства дисперсных металлоторходов / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2015. – Т. 79, № 2. – С. 5–13.

References

1. *Belorusskij MZ po itogam 2023 goda uvelichit vy'pusk stali na 15 %* [Belarusian Steel Works to increase steel output by 15 % in 2023]. Available at: <https://www.metalbulletin.ru/news/black/10176405/> (accessed 29 November 2024).
2. *Osvoenie i razrabotka novy'x vidov produkcii. BMZ ob osnovny'x zadachax na 2025 god* [Mastering and development of new types of products. BMP on the main tasks for 2025]. Available at: <https://belta.by/economics/view/osvoenie-i-razrabotka-novyh-vidov-produktsii-bmz-ob-osnovnyh-zadachah-na-2025-god-690444-2025/?ysclid=m8e8hr9tjp860647906> (accessed 18 March 2025) (in Russian)

3. *Vneshnyaya trgovlya tovarami* [Foreign trade in goods]. Available at: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/vneshnyaya-torgovlya/vneshnyaya-torgovlya-tovarami/> (accessed 18 March 2025). (in Russian)
4. *Otxody* [Waste]. Available at: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/makroekonomika-i-okruzhayushchaya-sreda/okruzhayushchaya-sreda/sovmestnaya-sistema-ekologicheskoi-informatsii2/i-othody/> (accessed 29 November 2024). (in Russian)
5. Tuktarova I. O., Bolotov R. A. *Analiz sushchestvuyushchih metodologicheskikh podhodov k probleme ustanovleniya granic pochvennogo zagryazneniya osnovnymi polyutantami i metalsoderzhashchimi nanochasticami v rajonah raspolozheniya nesankcionirovannykh svalok* [Analysis of existing methodological approaches to the problem of establishing the boundaries of soil pollution by basic pollutants and metal-containing nanoparticles in areas of unauthorized landfills]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal = Nanotechnology in Construction: An online scientific journal*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 193–200 (accessed 18 March 2025). (in Russian)
6. *Ob utverzhdenii, vvedenii v dejstvie obshchegosudarstvennogo klassifikatora Respubliki Belarus'. postanovlenie Ministerstva prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Resp. Belarus', 09 dekabrya 2019 goda, № 3-T* [On approval, enactment of the national classifier of the Republic of Belarus : Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, December 09, 2019, No. 3-T] *ETALON. Zakonodatel'stvo Respubliki Belarus'. Nac. Centr pravovoj inform. Resp. Belarus'* [ETALON. Legislation of the Republic of Belarus. National Center for Legal Information. Republic of Belarus]. Minsk, 2024. (in Russian)
7. Marcul' V. N., Lihacheva A. V., Zalygina O. S., Shibeka L. A., Romanovskij V. I. *Elementnyj i fazovyj sostav gal'vanicheskikh shlamov, osadkov ochistnykh sooruzhenij mashinostroitel'nyh i priborostroitel'nyh predpriyatij Respubliki Belarus* [Elemental and phase composition of galvanic sludge, sediments of sewage treatment plants of machine-building and instrument-making enterprises of the Republic of Belarus]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2013, no. 1, pp. 113–118 (in Russian)
8. Freddy R., Guimarães A., Vivoni A., Schroder R. Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 266, part B, pp. 57–65.
9. Kim J., Cho M., Jung M., Kim J., Yoon Y. Rotary hearth furnace for steel solid waste recycling: Mathematical modeling and surrogate-based optimization using industrial-scale yearly operational data. *Chemical Engineering Journal*, 2023, vol. 464, pp. 125–133.
10. Abdrakhimov V. Z. *Ispol'zovanie metallurgicheskix kal'cij-, alyuminij- i zhelezosoderzhashchix shlakov v proizvodstve zharostojkix betonov na osnove ortofosfornoj kisloty* [Use of metallurgical calcium-, aluminum- and iron-containing slags in the production of heat-resistant concrete on the basis of orthophosphoric acid]. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 82–95. (in Russian)
11. Yusuf Er, Mucahit Sutcu, Osman Gencel, Ermedin Totiç, Ertugrul Erdogmus, Vedat Veli Cay, Muhammad Junaid Munir, Syed Minhaj Saleem Kazmi. Recycling of metallurgical wastes in ceramics: A sustainable approach. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 349, pp. 45–52.
12. Runfeng Li, Yang Zhou, Cuiwei Li, Shibo Li, Zhenying Huang. Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 213, pp. 43–50.
13. Yan Xia, Daquan Shi, Ruolin Zhao, Kunyang Yu, Minghao Liu, Hengjun Mei, Lei Xu, Yading Zhao, Lei Wang. Iron-rich industrial waste enhanced low-carbon radiation shielding functional composites. *Journal of Cleaner production*. 2024, vol. 449, pp. 97–104.
14. Rovin S. L., Rovin L. E. *Konstruktivny'e osobennosti rotacionny'x pechej* [Design features of rotary furnaces]. *Lit'e i metallurgiya = Casting and Metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 49–59. (in Russian)
15. Thomas Ottink, Nathalia Viecei, Mark R. St J. Foreman, Martina Petranikova. Novel approach to recycling of steel swarf using hydrometallurgy. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, vol. 185, pp. 235–241.
16. Lin Wang, Yongbin Yang, Yang Ou, Peiyao Tang, Chen Liu, Qiang Zhong, Yan Zhang, Lingyun Yi, Qian Li, Zhucheng Huang, Tao Jiang. Synergistic conversion of iron ore sintering dust and waste biochar to produce direct reduction iron and syngas: Gasification, reduction behavior and thermodynamic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2024, vol. 434, pp. 27–31.
17. Xixiang Liu, Hengyi Wang, Chenxu Wang, Liyang Zhao, Honghui Pan, Yan Liu, Liying Liang, Chuanqi Zhao, Shiyong Huang. Self-endowed magnetic photocatalysts derived from iron-rich sludge and its recycling in photocatalytic process for tetracycline degradation. *Bioresource Technology*, 2024, vol. 395, pp. 146–151.
18. Wenru Liu, Tianhao, Jianfang Wang, Yaoliang Shen, Xiaoming Ji, Dianhai. A new concept of waste iron recycling for the enhancement of the anammox process. *Chemosphere*, 2022, vol. 307, part 4, pp. 78–86.
19. Yang Jiang, Changhong Peng, Kangeng Zhou, Zheng Hu, Guopeng Zhang, Yehuizi Wu, Jinzhong Zhang, Wei Chen. Extraction of iron from waste titanium whitewash to produce LiFePO₄ batteries. *Clean Production*, 2023, vol. 415, pp. 137–145.
20. Kazimirskaya E. N., Likhacheva A. V. *Zhelezosoderzhashchie othody kak vtorichnyj material'nyj resurs* [Iron-containing waste as a secondary material resource]. *Importozameshchenie, nauchno-tekhnicheskaya i ekonomicheskaya bezopasnost. Sbornik statej V Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Minskije nauchnye chteniya – 2022»* [Proc. of the V Int. sci. and tech. conf. "Minsk scientific readings – 2022"]. Minsk, 2022, vol. 1. pp. 157–16. (in Russian)
21. Mohammad Saood Manzar, Muntathir Alshabib, Umair Alam, Muhammad Nawaz, Mukarram Zubair, Anamália Ferreira Silva, Nuhu Dalhat Mu'azu, Lucas Meili, Emre Çevik, Hissah A. Alqahtani. Comparative adsorption of Eriochrome black T onto recyclable steel dust wastes: Isotherm, kinetics and thermodynamic studies. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, vol. 645, pp. 59–65.
22. Lingjun Ma, Lina Han, Shuai Chen, Jiangliang Hu, Liping Chang, Weiren Bao, Jianchen Wang. Rapid synthesis of magnetic zeolite materials from fly ash and iron-containing wastes using supercritical water for elemental mercury removal from flue gas. *Fuel Processing Technology*. 2019. vol. 189. pp. 39–48.

23. Ping Li, Xinran Li, Fengjun Li. A novel recycling and reuse method of iron scraps from machining process. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 266, pp. 79–85.
24. Sokolov L. I., Sokolov K. L. *Poluchenie zhelezosoderzhashhego koagulyanta iz otkodov shlifoval'nogo proizvodstva* [Preparation of iron-containing coagulant from grinding wastes]. *Sistemny'e tekhnologii = System Technologies*, 2023, vol. 4, no. 49, pp. 154–160. (in Russian)
25. Shamatov S. A., Rakhmanov I. U. *Poluchenie sul'fata natriya i zhelezooksidnogo pigmenta na osnove zheleznogo kuporosa* [Preparation of sodium sulfate and iron-oxide pigment on the basis of iron sulfate]. *Scientific journal Impact Factor*, 2021, vol. 1, no. 4, pp. 1478–1482. (in Russian)
26. Ruzavin A. A. *Sintez krasnogo zhelezooksidnogo pigmenta na osnove konverternogo staleplavil'nogo shlaka dlya stroitel'noj industrii* [Synthesis of red iron oxide pigment on the basis of converter steelmaking slag for the construction industry]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the South Ural State University*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 19–27. (in Russian)
27. Wegman E. F., Zharebin B. N., Pokhvisnev A. N., e.a. *Metallurgiya chuguna* [Iron metallurgy]. Moscow, 2004, 774 p. (in Russian)
28. *Klassifikatsiya zhelezny'x rud* [Classification of iron ores]. Available at: <https://rosmining.ru/wp-content/uploads/2022/05/zheleznyh-rud-.pdf?ysclid=m9jr9njtom735205766> (accessed 16 April 2025). (in Russian)
29. Urbanovich N. I., Korneev S. V. *Analiz sostava i tekhnologii pererabotki dispersny'x zhelezosoderzhashhix otkodov* [Analysis of composition and processing technology of dispersed iron-containing waste]. *Lit'e i metallurgiya = Casting and Metallurgy*, 2021, no. 4, pp. 66–69. (in Russian)
30. Fedoseev V. B., Zorin A. D., Fedoseeva E. N., Zanozina V. F., Zhebryakov E. V. *Pererabotka zhelezosoderzhashhix py'levidny'x otkodov metallurgicheskogo proizvodstva v pigment dlya okraski stroitel'ny'x materialov* [Processing of iron-containing dusty wastes of metallurgical production into pigment for coloring of building materials]. *Butlerovskie soobshheniya = Butler Communications*, 2013, vol. 42, no. 9, pp. 94–102. (in Russian)
31. Rovin S. L., Rovin L. E. *Klassifikatsiya i svoystva dispersny'x metallotkodov* [Classification and properties of dispersed metal waste]. *Lit'e i metallurgiya = Casting and Metallurgy*, 2015, vol. 79, no. 2, pp. 5–13. (in Russian)

Информация об авторах

Казимирская Екатерина Николаевна – аспирант кафедры промышленной экологии, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь). E-mail: kazimirskaaekaterina@gmail.com

Лихачева Анна Владимировна – кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленной экологии, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь). E-mail: alikhachova@mail.ru

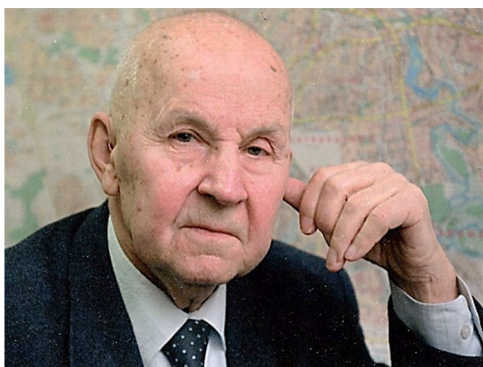
Information about the authors

Ekaterina N. Kazimirskaya – Postgraduate student, Department of Industrial Ecology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus). E-mail: kazimirskaaekaterina@gmail.com

Anna V. Likhacheva – Ph. D. (Technics), Head of the Department of Industrial Ecology, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus). E-mail: alikhachova@mail.ru

ЮБИЛЕИ JUBILEE

ЖИЗНЬ НА СЛОМЕ ЭПОХ: К 85-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АКАДЕМИКА В. Ф. ЛОГИНОВА *LIFE AT THE BREAK OF EPOCHS: TO THE 85th ANNIVERSARY OF ACADEMICIAN V. F. LOGINOV*



8 марта 2025 г. исполнилось 85 лет со дня рождения известного ученого-географа в области климатологии, мониторинга окружающей среды и природопользования Владимира Фёдоровича Логинова.

В этом году отмечается и другая юбилейная дата – 60-летие научной деятельности Владимира Фёдоровича.

Академик Национальной академии наук Беларуси, доктор географических наук, профессор, лауреат Государственной премии Республики Беларусь, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, дважды лауреат премии НАН Беларуси – вот далеко не полный перечень званий В. Ф. Логинова и полученных им наград. Он является Почетным экологом Республики Беларусь, награжден медалью Франциска Скорины,

золотой медалью НАН Беларуси, нагрудными знаками «Большая медаль НАН Беларуси», «Сярэбраны медаль Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі «За дасягненні ў навуцы» и «За заслугі перад Нацыянальнай акадэміяй навук Беларусі». О признании его заслуг за рубежом свидетельствуют звание академика Российской академии наук и Почетный доктор Национальной академии наук Украины, а также награды отличник Госкомгидромета СССР, памятная медаль Парламентского Собрания Союза Беларуси и России, медаль Союзного государства «За безупречную службу».

Научная деятельность В. Ф. Логинова началась в 1965 г. с поступления в аспирантуру Ленинградского государственного университета практически сразу после окончания Ленинградского высшего инженерного морского училища им. адмирала С. О. Макарова (в настоящее время – Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова). Уже в 1967 г. Владимир Фёдорович защитил кандидатскую, а в 1982 г. в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова – докторскую диссертацию.

В трудовой биографии В. Ф. Логинова – работа в крупнейших научных центрах бывшего Советского Союза: Сибирском институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Сибирского отделения Академии наук СССР (г. Иркутск), Всесоюзном институте гидрометеорологической информации (г. Обнинск), Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (г. Ленинград). Владимир Фёдорович работал во Всемирной Метеорологической организации ООН, стажировался в Институте исследования плазмы Стэнфордского университета, принимал участие в разработке и реализации ряда проектов Всемирной климатической программы, был заместителем председателя международного организационного комитета и руководящей группы Совета Европы по проведению Европейского года охраны природы. В. Ф. Логинов – один из организаторов и неизменный член бюро Объединенного Научного совета по фундаментальным географическим проблемам при Международной ассоциации Академий наук.

С 1990 г. Владимир Фёдорович работает в нашей республике в Институте природопользования НАН Беларуси (до 2008 г. – Институт проблем использования природных ресурсов и экологии Академии наук Беларуси): сначала в должности заместителя директора по научной работе; затем в течение 11 лет – директора; в 2008 г. добровольно покинул административную работу, чтобы больше времени уделять научным исследованиям, и перешел на должность главного научного сотрудника.

Академик В. Ф. Логинов является известным в стране и за рубежом ученым в области исследования климата и его изменений под влиянием естественных и антропогенных факторов. Под его руководством выполнено крупномасштабное теоретическое и прикладное исследование климата Беларуси, реализован ряд прикладных разработок по мониторингу глобального климата и природной

среды республики. Разработаны сценарии изменения климата с прогнозом динамики гидрологических и агроклиматических показателей и их последствий. Владимир Фёдорович является одним из авторов первых международных бюллетеней мониторинга глобального климата, под его руководством и при непосредственном участии разработаны научно-прикладной справочник по агроклиматическим ресурсам Республики Беларусь и Национальная климатическая программа. По инициативе ученого и под его руководством была налажена подготовка экологического бюллетеня «Состояние природной среды Беларуси», выпуск которого осуществлялся почти 25 лет.

В. Ф. Логинов стал инициатором присоединения Республики Беларусь к Договору об Антарктиде, развития антарктических исследований, а также создания государственной программы, касающейся Антарктиды. Владимир Фёдорович входит в состав Межведомственной комиссии Республики Беларусь по вопросам исследования Антарктики, является участником постоянно действующей двусторонней рабочей группы по вопросам сотрудничества в Антарктике и координации позиций Сторон Договора об Антарктике и Соглашения между Правительством Республики Беларусь и Российской Федерацией.

Ученый много внимания уделяет подготовке и представлению на различных уровнях специальных обзоров и аналитических докладов, посвященных проблемам изменения климата. Его выкладки и рекомендации используются Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды, Министерством сельского хозяйства и продовольствия, Министерством лесного хозяйства, Министерством экономики, областными исполнительными комитетами. В 2014 г. в составе правительственной делегации он участвовал в Климатическом Саммите Генеральной ассамблеи ООН и инвестиционном форуме «Беларусь – США», которые проходили в г. Нью-Йорке.

По итогам работы 2023 г. В. Ф. Логинов вошел в состав группы климатологов – победителей конкурса Топ-10 результатов деятельности ученых НАН Беларуси в области фундаментальных и прикладных исследований.

Востребованность результатов исследований, творческий энтузиазм и большая работоспособность Владимира Фёдоровича позволили ему с 2020 г. подготовить ряд монографий: «Климат Беларуси: пространственно-временные изменения и предпосылки регулирования» (2020, в соавт. с С. А. Лысенко и В. И. Мельником), «Космические факторы климатических изменений» (2020), «Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования» (2020, в соавт. С. А. Лысенко и В. И. Мельником), «Диагноз глобального климата» (2021), «Современные изменения климата» (2024). Пять монографий за такой короткий срок – прекрасная иллюстрация продуктивности научных исследований В. Ф. Логинова, его глубокой привязанности и увлеченности. Общее же количество научных работ – более 600, в том числе несколько десятков книжных изданий (монографий, справочных изданий, учебных пособий). Под редакцией Владимира Фёдоровича издано более 50 монографий, книг, бюллетеней и сборников научных трудов.

Пристальное внимание ученого направлено на научно-педагогическую деятельность. В течение многих лет он читал лекции в Ленинградском, Иркутском и Белорусском государственных университетах, Международном экологическом университете им. А. Д. Сахарова. Им подготовлены 3 доктора и 14 кандидатов наук. Он создал и возглавляет динамично развивающуюся академическую эколого-географическую научную школу.

Накануне юбилея Владимир Фёдорович подготовил книгу «Жизнь на сломе эпох: автобиографический очерк» (2025), в которой ярко описаны отдельные эпизоды жизни и работы, приведены размышления о жизни, науке, образовании и людях, с которыми ему посчастливилось работать в разное время и в разных странах. В ней юбиляр эмоционально рассказывает о прожитом и пережитом, в том числе в военные годы, рассуждает о роли раннего взросления, принятия решений и ответственности за свои поступки. Книга поражает обилием фактических данных о тех или иных событиях и научных учреждениях, а также теплотой воспоминаний об учителях, коллегах и друзьях.

В. Ф. Логинов, несмотря на столь солидный пройденный им трудовой путь, полон энергии, творческих замыслов и научных идей: человек большой эрудиции и широких взглядов всегда готов делиться опытом и знаниями, добрым советом.

Искренне поздравляем Владимира Фёдоровича с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, научного долголетия, семейного благополучия, реализации всех творческих замыслов!

**С. А. Лысенко, Т. И. Кухарчик, С. В. Какарека,
В. С. Хомич, Г. А. Камышенко**

К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Г. П. БРОВКИ TO THE 75th ANNIVERSARY OF G. P. BROVKA



1 мая исполнилось 75 лет доктору технических наук, профессору, главному научному сотруднику Института природопользования НАН Беларуси Геннадию Петровичу Бровке – известному ученому и ведущему специалисту в области исследования прочностных и теплофизических свойств грунтов в талом и мерзлом состояниях, а также в сфере разработки физико-математических основ численного моделирования в природных средах взаимосвязанных процессов переноса тепла, влаги и токсичных водорастворимых соединений, включая радионуклиды.

Родился Геннадий в д. Бошовка Весницкого сельсовета Ушачского района Витебской области. Родители, отец Бровка Пётр Петрович и мать Алексеёнок Мария Макаровна, познакомились в поселке лесорубов Мирном, где работали в организованном после окончания войны леспромпхозе. Отец родом из д. Ветче, расположенной на противоположном от поселка берегу оз. Ветчинское. Семья его родителей была партизанской. В Великую Отечественную войну отец вместе со старшим братом Владимиром с самого начала партизанского движения воевал с фашистами в бригаде Дубова – Лобанка. После окончания войны он продолжил служить в армии. Участвовал в ликвидации бандформирований в Прибалтике, Западной Украине, Западной Белоруссии. После демобилизации в 1949 г. вернулся домой и устроился на работу в леспромпхоз. Мать во время блокады Полоцко-Лепельской партизанской зоны в 1944 г. вместе со старшей сестрой Елизаветой насильно были угнаны в Германию, где находились в рабочем лагере до конца войны, а их 14-летний брат Михаил ушел с партизанами и пропал без вести.

Детские годы юбиляра прошли в поселке Мирный. В 1957 г. от туберкулеза умер отец, и у матери на руках осталось четверо детей, среди них Геннадий был старшим. Пришлось нелегко. Мария Макаровна ночью сторожила магазин, а днем, как и все, работала по хозяйству. С ранних лет Геннадий помогал матери и в работе, и по хозяйству. Вместе с младшим братом Павлом они обеспечивали семью ягодами, грибами, заготавливали дрова, сено и т. п. С 14 лет вместе с матерью убирали лесосеки после вырубki от порубочных остатков. За это платили немалые по тем временам деньги – 17,5 руб. за гектар. За все школьные годы ими таким вот образом были подготовлены к новым посадкам леса около 200 гектаров лесосек. Иногда ребята даже пропускали занятия в школе, чтобы вовремя успеть сдать делянку. Это позволяло обеспечивать семью самым необходимым.

Еще в школе у Геннадия проявились незаурядные способности к точным наукам, поэтому после ее окончания в 1967 г. он подал документы на физический факультет Белорусского государственного университета. Однако имея всего лишь периферийную подготовку, трудно было состязаться с выпускниками специализированных классов и школ г. Минска и других крупных городов. Геннадий вернулся домой и устроился на работу в бухгалтерию Малодолецкого лесоучастка. В 1968 г., сдав профилирующие дисциплины на 5 баллов, он заслуженно стал студентом физического факультета Белгосуниверситета.

По окончании учебы в 1973 г. Геннадий Петрович по распределению был направлен на работу в Институт торфа Академии наук БССР. В это время его возглавлял будущий академик И. И. Лиштван, стараниями которого была создана новая лаборатория физико-химической механики торфа. Одновременно в данной лаборатории была организована группа по изучению геоэкологии мерзлых органических грунтов. Выпускник кафедры теплофизики Белгосуниверситета нашел и свое место в этой группе, и работу на всю свою жизнь. Еще до защиты кандидатской диссертации он фактически стал ее идейным руководителем.

Успешно закончив аспирантуру, в 1981 г. Г. П. Бровка защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование характеристик внутреннего тепло- и массопереноса в торфе с целью прогнозирования водного и теплового режимов при промерзании торфяных залежей» по специальности «Технология и комплексная механизация торфяного производства», а в 2001 г. – докторскую диссертацию на тему «Преобразование структуры, тепломассоперенос и фазовые переходы в органогенных дисперсных системах» сразу по двум специальностям: 25.00.20 – геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика и 25.00.36 – геоэкология.

За время работы в институте Геннадий Петрович прошел путь от инженера до главного научного сотрудника. В 2008 г. академик И. И. Лиштван передал ему руководство лабораторией, которая к тому времени называлась лабораторией физико-химической механики природных дисперсных систем.

С 2021 г. Г. П. Бровка работает в должности главного научного сотрудника в той же лаборатории в том же институте, который теперь называется Институт природопользования НАН Беларуси.

В настоящее время Геннадий Петрович развивает актуальное научное направление в области «Геотехнология», которое можно характеризовать как научно-техническое обоснование повышения эффективности технологических процессов освоения минерально-сырьевых ресурсов недр. Г. П. Бровка является известным ученым в областях геотехнологии, геомеханики и геоэкологии, автором многих работ по исследованию взаимосвязанных процессов преобразования структуры, переноса тепла, влаги и водорастворимых соединений в органогенных и минеральных природных дисперсных системах при фазовых переходах воды в лед. Используя основные закономерности физико-химической механики и тепломассопереноса, Геннадий Петрович достиг значительных успехов в разработке математических моделей физико-механических и теплофизических процессов, соответствующих алгоритмов для численного расчета преобразования структуры, температурных и влажностных режимов, конвективно-диффузионного переноса соединений тяжелых металлов и радионуклидов в органогенных природных дисперсных системах. В его работах удачно сочетаются теоретические исследования с решением прикладных задач. Результаты этих исследований известны в Беларуси, России и дальнем зарубежье.

Г. П. Бровка опубликовал более 225 научных трудов (единолично и в соавторстве), в том числе 3 монографии (одна в соавторстве с П. Н. Давидовским), 130 научных статей, 20 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

В работах Геннадия Петровича получили развитие положения физико-химической механики мерзлых горных пород, включающие теоретическое описание формирования фазового состава, процессов переноса, морозного пучения, формирования напряженно-деформированного состояния и преобразования структуры в промерзающих горных породах и грунтах.

На базе разработанных математических моделей, конечно-разностных схем и алгоритмов задач теплопереноса с фазовыми переходами создана прикладная программа CRYOS 3D для расчета процессов замораживания грунтов на участке заложения шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях. Данная программа позволяет вести расчет и визуализацию трехмерных процессов замораживания горных пород с последующей оптимизацией режима замораживания с целью экономии энергетических ресурсов и сокращения времени замораживания (программные средства зарегистрированы в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь и сертифицированы в Российской Федерации).

Под руководством Г. П. Бровки разработан комплекс приборов для исследования теплофизических и деформационно-прочностных характеристик горных пород при отрицательных температурах, необходимых для обоснования специальных методов проходки шахтных стволов калийных рудников с применением искусственного замораживания. Благодаря этому в указанном направлении за последние годы лабораторией физико-химической механики выполнены научно-исследовательские работы для обоснования проектов строительства 9 калийных рудников: в Беларуси (5), России (2), Туркменистане (1) и Таиланде (1).

Геннадием Петровичем усовершенствована технология термической переработки торфа и других горючих ископаемых, бурых углей и горючих сланцев с разработкой оригинальных конструкций пиролизных установок и газогенераторов на фрезерном торфе и других сыпучих горючих материалах.

Научную работу Г. П. Бровка сочетает с педагогической деятельностью и подготовкой кадров высшей квалификации. Им подготовлены 3 кандидата наук, в том числе 2 единолично. Всего в группе, которую возглавлял Геннадий Петрович, защищено 7 кандидатских диссертаций. В каждую из этих работ ученый внес неоценимый вклад.

В период с 2003 по 2021 г. Г. П. Бровка являлся по совместительству профессором кафедры компьютерных технологий и систем на факультете прикладной математики и кафедры теоретической и прикладной механики на механико-математическом факультете Белгосуниверситета, где вел занятия по спецкурсам, связанным с физико-математическими основами компьютерного моделирования процессов энерго- и массопереноса в геоэкосистемах и горных породах.

В период с 2004 по 2014 г. Геннадий Петрович был членом и заместителем председателя экспертного совета Высшей аттестационной комиссии № 20 по техническим наукам. За плодотворную работу по подготовке и аттестации кадров высшей квалификации Г. П. Бровка награжден Почетной грамотой Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (2014 г.). С 2015 по 2023 г. Геннадий Петрович входил в состав совета по защите диссертаций Д 01.23.01 при государственном научном учреждении «Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси» (член совета, ученый секретарь совета, председатель совета).

В 2006 г. Г. П. Бровка за выдающийся вклад в социально-экономическое развитие республики удостоен персональной надбавки Президента Республики Беларусь специалистам и руководителям организаций здравоохранения, науки, культуры и образования.

За разработку физико-математических основ численного моделирования взаимосвязанных процессов переноса тепла, влаги и водорастворимых соединений в природных средах, а также вклад в повышение эффективности освоения минерально-сырьевых ресурсов Геннадий Петрович награжден Почетной грамотой НАН Беларуси (2002 и 2012 г.), нагрудным знаком «У гонар заснавання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (2017 г.), нагрудным знаком имени В. М. Игнатовского (2022 г.). В 2025 г. за значительный вклад в научно-техническое обеспечение решение проблем тепломассопереноса в почвах, грунтах и горных породах, практическую реализацию разработок при выполнении экспортных работ и подготовку кадров высшей квалификации Г. П. Бровке вручена Почетная грамота Национальной академии наук Беларуси.

Геннадий Петрович полон сил и творческих планов. В работе он по-прежнему неустанен и заряжен новыми идеями.

Коллеги и друзья искренне поздравляют Геннадия Петровича Бровку с юбилеем, желают здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов в развитии физико-химической механики природных дисперсных систем, включающей направление, связанное с мерзлыми горными породами.

**С. А. Лысенко, Г. А. Камышенко, Ю. Г. Янута,
А. И. Сорокин, В. М. Крайко, И. В. Дедюля, А. А. Мурашко**

К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ М. М. ЧЕРЕПАНСКОГО *TO THE 75th ANNIVERSARY OF M. M. CHEREPANSKII*

24 июня 2025 г. Михаилу Михайловичу Черепанскому – профессору кафедры гидрогеологии имени В. М. Швеца, доктору геолого-минералогических наук – исполнилось 75 лет.

Более полувека Михаил Михайлович посвятил гидрогеологии. В 1967 г. он поступил в Белорусский государственный университет, в 1970 г. был переведен в Гомельский государственный университет, который закончил в 1972 г., получив квалификацию «инженер-геолог-гидрогеолог», и стал работать гидрогеологом в институте «Союзгипромелиоводхоз» Министерства мелиорации и водного хозяйства (Минводхоза) СССР. С 1972 по 1973 г. проходил службу в рядах Советской Армии. Затем с 1974 по 1975 г. работал старшим инженером Центрального научно-исследовательского института комплексного использования водных ресурсов (ЦНИИКИВР) Минводхоза СССР. В 1975 г. поступил в аспирантуру этого НИИ, которую окончил в 1978 г. В 1983 г. получил степень кандидата геолого-минералогических наук. В 1987 г. М. М. Черепанскому было присвоено звание старшего научного сотрудника по специальности «Гидрогеология». С 1979 по 1992 г. продолжил работу младшим научным сотрудником, а затем старшим научным сотрудником в ЦНИИКИВР Минводхоза СССР. С 1992 по 2003 г. находился в должностях заведующего лабораторией, заместителя директора по научной работе, директора института ЦНИИКИВР Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. С мая 2003 г. по март 2004 г. был ведущим научным сотрудником, руководителем группы Института проблем использования природных ресурсов и экологии Национальной академии наук Беларуси. В 2004–2005 гг. являлся руководителем Московско-Окского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов России, в 2005–2007 гг. – заместителем директора Национального информационного агентства «Природные ресурсы». С 2005 г. работает в ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)» на должностях проректора, начальника управления, заведующего кафедрой гидрогеологии. Получил степень доктора геолого-минералогических наук (2007 г.) и звание профессора «гидрогеологии» (2018 г.) одного из ведущих геологических ВУЗов России.



Стаж Михаила Михайловича насчитывает 45 лет научно-педагогической деятельности. Он является автором более 260 научных публикаций, среди которых 26 учебных пособий и 37 монографий. Является активным участником международных конференций и съездов. Все это говорит о его огромном вкладе в развитие геологической науки.

М. М. Черепанский – профессиональный гидрогеолог, сертифицированный (94-HG-1081) Американским институтом гидрологии (1994 г.), член Международной ассоциации гидрогеологов (1996 г.), академик Белорусской инженерной академии (1997 г.).

Высококвалифицированный специалист в области использования и охраны водных ресурсов, гидрогеологии и экологии посвящает свои научные исследования теории и практике управления охраны водных ресурсов, взаимосвязи поверхностных и подземных вод, прогнозу влияния отбора подземных вод на гидрологические и гидрогеологические условия прилегающих территорий, их защите, охране водных объектов от загрязнения и истощения. Под руководством Михаила Михайловича выполнены фундаментальные и прикладные научно-исследовательские работы по установлению закономерностей взаимосвязи поверхностных и подземных вод, определению влияния отбора подземных вод на основные компоненты природной среды (поверхностные и подземные воды, почвы, растительность), разработке методических рекомендаций по охране поверхностных и подземных вод с учетом экологических факторов, разработке мероприятий по экологической безопасности объектов хранения нефтепродуктов и автозаправочных станций. Часть его работ посвящена оценке влияния карьерных водоотливов на поверхностные и подземные воды прилегающих территорий и разработке мероприятий по ликвидации негативных последствий.

М. М. Черепанский стал инициатором постановки и разработки реализованных в Республике Беларусь исследований по научному обоснованию водоохранных зон и прибрежных зон больших и средних рек, а также водотоков и водоемов в городах. Результаты этих исследований внедрены

и используются для водообеспечения и водоотведения целого ряда объектов, при оценке влияния на водные ресурсы, разработке водоохранных мероприятий и программ мониторинга, а также восстановлении малых водотоков и водоемов, рекультивации карьеров при добыче полезных ископаемых, полигонов захоронения твердых бытовых отходов, водообеспечения атомных электростанций и производств в Российской Федерации.

Михаил Михайлович является автором «Методики учета использования подземных вод при установлении водохозяйственных балансов для оценки доступных водных ресурсов в схемах комплексного использования и охраны водных объектов речных бассейнов России».

Ученый принимал активное участие в выполнении международных программ по охране и управлению водными ресурсами бассейнов рек Днепр, Западная Двина, Западный Буг, Неман. Он стал научным руководителем проекта «Оценка современного состояния подземных источников питьевого водоснабжения бассейна р. Днепр (в пределах Беларуси)» (2004 г.) в рамках разработки проекта ВУ/00/001 «Система управления окружающей средой и мониторинга Беларуси (Восстановление бассейна реки Днепр)». Принимал участие в разработке и выполнении российско-белорусских проектов фонда фундаментальных исследований «Перспективы надежного обеспечения водными ресурсами АЭС европейской территории России и Белоруссии в условиях изменяющегося климата» (2012–2013 гг.), «Подземный сток и ресурсы пресных подземных вод бассейна р. Западной Двины» (2014–2015 гг.), «Подземные воды в водных ресурсах и водном балансе крупных артезианских бассейнов (на примере западной части Московского артезианского бассейна)» (2016–2017 гг.).

М. М. Черепанский был наблюдателем от Республики Беларусь в Хельсинской конвенции по защите окружающей среды Балтийского моря (HELCOM), руководителем рабочей группы по проблемам охраны водных ресурсов Межгосударственного экологического совета Содружества Независимых Государств, членом Экологического Совета при Комиссии Парламентского Собрания Союза Беларуси и России по природным ресурсам, экологии и охране окружающей среды.

В 2012–2022 гг. Михаил Михайлович являлся координатором (с российской стороны) по подготовке концепций программ Союзного государства: «Разработка современных технологий геологического изучения, рационального и экологически безопасного использования ресурсов недр России и Беларуси» («Геологоразведка и природопользование»); «Использование и охрана трансграничных вод Республики Беларусь и Российской Федерации» («Трансграничные воды»), «Разработка программно-аппаратной платформы для оживления водных объектов в городах России и Беларуси» («Живая вода»).

М. М. Черепанский был членом Общественного совета при Росприроднадзоре, членом редакционного совета бюллетеня «Использование и охрана природных ресурсов в России».

За многолетний и добросовестный труд Михаил Михайлович награжден знаком «Отличник Минводхоза СССР» (1989 г.), Почетной грамотой Минприроды Республики Беларусь (2000 г.), Почетной грамотой Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (2010 г.), серебряным нагрудным знаком «Геологическая служба России» (2014 г.), медалью имени А. Е. Ферсмана «За заслуги в геологии» (2016 г.), нагрудным знаком «Отличник водного хозяйства» (2018 г.), нагрудным знаком «Почетный работник водного хозяйства» (2020 г.).

Последние 20 лет М. М. Черепанский работает на кафедре гидрогеологии имени В. М. Швеца МГРИ, где успешно сочетает учебно-педагогическую работу с научно-исследовательской деятельностью, участвует в разработке учебных планов и программ по подготовке и переподготовке гидрогеологов, инженеров-геологов и горных инженеров. Читает курсы лекций по учебным дисциплинам «Поиски и разведка подземных вод», «Гидрогеологические исследования» «Взаимосвязь подземных и поверхностных вод», «Инженерная гидрогеология исторических территорий», «Комплексное использование пресных подземных и речных вод», «Гидрогеологическое моделирование», «Современные проблемы поисково-разведочных работ и оценки запасов пресных подземных вод», «Комплексное использование подземных вод», «Гидрогеологические исследования различных типов месторождений подземных вод», ведет практические и лабораторные занятия, руководит дипломными и курсовыми проектами, производственной и преддипломной практиками, а также научной работой аспирантов, магистрантов и студентов.

Михаила Михайловича характеризует широта мышления, высокая эрудиция и увлеченность наукой. Его отличает огромное трудолюбие, оптимизм и доброжелательность к коллегам. Коллеги и друзья поздравляют Михаила Михайловича с замечательным юбилеем и желают ему здоровья и творческих успехов в научной и педагогической деятельности.

**В. Ф. Логинов, В. И. Пашкевич, В. Г. Жогло,
Н. М. Томина, В. С. Хомич, Я. Г. Грибик, А. Э. Томсон**

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Природопользование» просит авторов руководствоваться приведенными ниже правилами.

I. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции соответствующего института либо выписку из протокола заседания ученого совета, отдела или кафедры, а также акт экспертизы).

II. Статья предоставляется в редакцию на белорусском или русском языках; шрифт – Arial, кегль – 10 (в том числе в формулах); межстрочный интервал – одинарный. Занумерованные формулы выключаются в отдельную строку. Статья должна быть подписана всеми авторами.

III. Статья должна иметь следующую структуру:

1. Индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК);

инициалы и фамилии авторов;

название статьи;

полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием города и страны.

2. 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; должна быть информативной, хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации – краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы).

3. Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования; рекомендуемое количество ключевых слов 5–10.

4. Затем метатекстовые данные (все то, что предшествует основному тексту статьи) приводятся на английском языке, причем аннотация должна быть оригинальной (т. е. не являться дословным переводом русскоязычной аннотации). Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводятся на русском (белорусском) языке.

5. Основной текст статьи должен составлять 10–16 с. (т. е. около 40 тыс. знаков); в этот объем также входят таблицы и рисунки, число которых не должно превышать 10. Изложенный материал должен быть четко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). В русско- и белорусскоязычных статьях рекомендуется делать подписочные подписи и надписи на самих иллюстрациях на двух языках – *русском (белорусском) и английском*.

6. Список использованной литературы (не более 40 ссылок) оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.1-2003). Цитируемая литература приводится общим списком по мере упоминания, ссылки в тексте даются порядковым номером в квадратных скобках (напр., [1]); ссылки на неопубликованные работы не допускаются).

7. Затем приводится 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 (для журналов можно не делать)], выходные данные с обозначениями на английском языке.

7. Если присутствует информация о финансировании (поддержке грантами проектов и т. п.), ее следует давать на русском (белорусском) и английском языках под заголовками «Благодарности» («Падзяка»), «Acknowledgements».

IV. Для подготовки метаданных (так называемый информационный лист) на отдельной странице следует указать на русском и английском языках для каждого автора: фамилию, имя и отчество (полностью), звание, должность, место работы с указанием адреса, e-mail (для оперативной связи указать телефоны).

V. Электронный вариант статьи предоставляется на диске, флэшке или присылается по электронной почте в редакцию журнала – eco@nature-nas.by. Текст должен быть набран в Word под Windows, формулы – в редакторе MathType.

Правила оформления статьи:

параметры страницы – формат A4; поля – верхнее и нижнее по 2,5 см, левое и правое по 2 см (**страницы не нумеровать!**);

текст набирается шрифтом Arial, кегль 10;

межстрочный интервал – одинарный;

абзацный отступ – 10 мм.

Вставку символов выполнять через меню «Вставка\Символ». Выключку вверх и вниз (C^2 , C_4) выполнять через меню «Формат\Шрифт\Верхний индекс», «Формат\Шрифт\Нижний индекс». Латинские буквы необходимо набирать *курсивом*, греческие – прямо (для набора греческих символов следует пользоваться гарнитурой Symbol). Обозначения математических функций (lim, sup, ln, sin, Re, Im и т. п.), символы химических элементов (N, C1) также набираются прямым шрифтом.

VI. Черно-белые и цветные рисунки вставляются в текст статьи (Word) после первого упоминания о них, а также даются в виде отдельных файлов в графическом формате (300 точек на дюйм). Фотографии, помещаемые в статью, должны иметь контрастное черно-белое или цветное изображение. Желательно предоставлять иллюстрации в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирается основной гарнитурой, причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 9 пунктов). Фотографии предоставляются в виде файлов (tif, jpg, png, eps) и в распечатанном виде. **Таблицы** должны иметь названия на русском и английском языках и располагаться непосредственно по тексту. Не рекомендуется выполнять горизонтальные таблицы. Следует **различать дефис «-» и тире «—»**. В тексте тире отделяется единичными пробелами, между цифрами и числами тире ставится без пробелов.

VII. Поступившая в редакцию статья направляется на рецензию. Основным критерием целесообразности публикации является новизна и информативность статьи. Если по рекомендации рецензента статья возвращается автору на доработку, то переработанная рукопись вновь рассматривается редколлегией. Статьи не по профилю журнала возвращаются 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, 2025

Редактор Н. Т. Гавриленко
Editor N. T. Gavrilenko

Компьютерная верстка Т. Н. Козловская
Computer page making T. N. Kozlovskaya

Переводчик М. Ю. Кравченко
Translator M. U. Kravchenko

Подписано в печать 17.06.2025.	<i>Signed into print 17.12.2024.</i>
Формат 60×90/8. Бумага офсетная.	<i>60×90/8 format. Office paper.</i>
Гарнитура Ариал. Печать цифровая.	<i>Arial garniture. Digital print.</i>
Усл. печ. л. 25,8.	<i>Conditional printed sheets 22,1.</i>
Уч.-изд. л. 25,2.	<i>Conditional edited sheets 21,6.</i>
Тираж 100 экз.	<i>Circulation 100 copies.</i>
Заказ № 402.	<i>Order No. 402.</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	<i>of the Ministry of Finance</i>
Республики Беларусь».	<i>of the Republic of Belarus».</i>
ЛП № 02330/89 от 3 марта 2014 г.	<i>Press license no. 02330/89 of 3 March 2014.</i>
Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск	<i>Kalvarijskaya Str. 17, 220004, Minsk</i>