

ISSN 2079-3928

Природо- пользование



2
2025

Государственное научное учреждение
«Институт природопользования
Национальной академии наук Беларуси»

Природопользование

2025. № 2

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*)
Курзо Б. В. – доктор технических 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
Рылова Т. Б. – доктор геолого-минералогических наук, доцент
Кухарчик Т. И. – доктор географических наук, профессор
Логинов В. Ф. – академик, доктор географических наук, профессор
Янута Ю. Г. – кандидат технических наук, доцент
Струк М. И. – кандидат географических наук, доцент
Зерницкая В. П. – доктор 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)
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>



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

Nature Management

2025. № 2

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*)
Boris Kurzo – D. Sc. (Technical), 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
Tatyana Rylova – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Docent
Tamara Kukharchyk – D. Sc. (Geography), Professor
Vladimir Loginov – Academician, D. Sc. (Geography), Professor
Yuri Yanuta – Ph. D. (Technical), Docent
Mikhail Struk – Ph. D. (Geography), Docent
Zernitskaya Valentina – D. Sc. (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)
Nikolay Rybalsky – D. Sc. (Biology), Professor (Russia)
Arcadiy Tishkov – Corresponding Member, D. Sc. (Geography) (Russia)
Mikhail Cherepanskiy – 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

С. А. Лысенко, К. С. Юдыцкая <i>S. A. Lysenko, K. S. Yudytskaya</i>	Коррекция ошибок мезомасштабного численного прогноза погоды методами машинного обучения <i>Error correction of mesoscale numerical weather forecast by machine learning methods</i>	5
С. А. Лысенко, И. В. Буюков, В. И. Мельник <i>S. A. Lysenko, I. V. Buyakov, V. I. Melnik</i>	Оценка проявления засух на почвах сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья с использованием температурно-влажностных и вегетационных индексов по данным дистанционного зондирования Земли <i>Assessment of drought manifestation on soils of agricultural lands of the Belarusian Lakeland using temperature-moisture and vegetation indices based on remote sensing data</i>	19
М. И. Струк, С. Г. Живнач, Г. М. Бокая <i>M. I. Struk, S. G. Zhivnach, G. M. Bokaya</i>	Оценка химического загрязнения малых рек пригородной зоны Минска <i>Assessment of chemical pollution of small rivers in the Minsk suburban area</i>	36
Г. П. Бровка, К. А. Агутин, И. Н. Дорожок <i>G. P. Brovka, K. A. Agutin, I. N. Dorozhok</i>	Прикладные программы для моделирования температурного режима деятельного слоя территории белорусской антарктической станции <i>Application programs for simulation the temperature regime of the active layer of the vicinity of the Belarusian Antarctic station</i>	46
Л. А. Кравчук, А. А. Яновский, Н. М. Баженова, С. Г. Живнач, Н. К. Быкова, П. В. Книга <i>L. A. Kravchuk, A. A. Yanovskiy, N. M. Bazhenova, S. G. Zhivnach, N. K. Bykova, P. V. Kniga</i>	Исследования экосистемных функций городской растительности с использованием геоинформационных систем и спутниковой съемки (на примере г. Пинска) <i>Study of ecosystem functions of urban vegetation using geoinformation systems and satellite imaging (on the example of Pinsk)</i>	62
Ю. С. Давидович, А. Н. Червань <i>Yu. S. Davidovich, A. N. Chervan</i>	Оценка динамики состояния структуры почвенного покрова геосистем Белорусского Полесья по данным дистанционного зондирования земли <i>Assessment of the dynamics of the state of the soil cover structure of the Belarusian Polesie geosystems based on remote sensing data</i>	75
Л. Н. Гертман, Н. Н. Шешко, С. И. Кузьмин <i>L. N. Gertman, N. N. Sheshko, S. I. Kuz'min</i>	Научное обоснование и разработка проектов водоохранных зон водных объектов крупных городов в контексте управления Водными ресурсами (на примере г. Минска) <i>Scientific substantiation and development of water protection zones projects for water bodies of cities in the context of water resources management (on the example of Minsk)</i>	88

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

В. И. Пашкевич, Е. А. Кухарик, А. М. Кухарик, К. Ю. Балашов <i>V. I. Pashkevich, E. A. Kukharik, A. M. Kukharik, K. Yu. Balashov</i>	Природные и антропогенные факторы формирования ресурсов и качества подземных вод на территории Беларуси <i>Natural and anthropogenic factors of the formation of groundwater resources and their quality of Belarus</i>	100
Я. Г. Грибик, П. В. Шаблыко, Н. В. Козловский, М. А. Шеметило <i>Ya. G. Gribik, P. V. Shablyko, N. V. Kozlovskiy, M. A. Shemetilo</i>	Анализ и результативность применяемых геолого-геофизических методов исследования недр земли энтерби в районе белорусской антарктической станции <i>Analysis and effectiveness of applied geological and geophysical methods for subsoil investigations of the enderby land in the area of the belarusian antarctic station</i>	114
Д. П. Плакс <i>D. P. Plax</i>	Силурийские отложения территории Беларуси <i>Silurian deposits in the territory of Belarus</i>	131

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

- Н. А. Жмакова, Н. Л. Макарова, Е. А. Семенчукова, А. А. Муратова** Антимикробная активность препаратов из сфагнового торфа и сфагнового мха с микроэлементами 146
H. A. Zhmakova, N. L. Makarova, E. A. Semenchukova, A. A. Muratova *Antimicrobial activity of preparations from sphagnum peat and sphagnum moss with microelements*
-
- М. Г. Калантаров, А. И. Сорокин, Н. Н. Шилович, Ю. Г. Янута** Анализ методов сушки торфяных гранул 156
M. G. Kalantarov, A. I. Sorokin, N. N. Shilovich, Yu. G. Yanuta *Analysis of peat granules drying methods*
-
- В. М. Крайко, В. М. Дударчик, Ю. Г. Янута, Е. В. Ануфриева, Е. Ю. Дорожко, Ю. Ю. Навоша** Физико-химическая характеристика продуктов окислительной деструкции торфов 172
V. M. Kraiko, V. M. Dudarchik, Yu. G. Yanuta, E. V. Anufrieva, E. Yu. Dorozhko, Yu. Yu. Navosha *Physico-chemical characteristics of peat oxidative degradation products*
-

ПАМЯТИ УЧЕНОГО
IN THE MEMORY OF A SCIENTIST

ПАМ'ЯТІ АКАДЭМІКА РАДЗІМА ГАЎРЫЛАВІЧА ГАРЭЦКАГА (07.12.1928–22.06.2025) 182
IN THE MEMORY OF ACADEMICIAN RADZIM GAURYLAVICH GARETSKY (07.12.1928–22.06.2025)

ПАМ'ЯТІ АКАДЕМІКА АЛЕКСЕЯ ВАСИЛЬЕВИЧА МАТВЕЄВА (23.05.1938–21.07.2025) 187
IN THE MEMORY OF ACADEMICIAN ALEXEY VASILYEVICH MATVEYEV (23.05.1938–21.07.2025)

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ
GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

УДК 551.509.313:004.032.26

Поступила в редакцию 23.10.2025

Received 13.10.2025

**КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК МЕЗОМАСШТАБНОГО ЧИСЛЕННОГО
ПРОГНОЗА ПОГОДЫ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ****С. А. Лысенко, К. С. Юдыцкая***Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

Аннотация. Проанализированы метрики успешности краткосрочных численных прогнозов погоды для территории Беларуси на основе мезомасштабной гидродинамической модели атмосферы WRF (Weather Research and Forecasting) с регионально адаптированным блоком моделирования подстилающей поверхности. Оценена эффективность коррекции систематических ошибок численных прогнозов приземных метеопараметров с применением метода экспоненциально взвешенного скользящего среднего и фильтра Калмана.

Предложен метод повышения оправдываемости мезомасштабных численных прогнозов, в котором поправки к прогностическим полям метеопараметров вычисляются с использованием моделей машинного обучения, а предикторами выступают прогнозы нескольких глобальных и региональных гидродинамических моделей атмосферы. Проведен сравнительный анализ эффективности коррекции численных прогнозов с применением моделей машинного обучения (XGBoost и ElasticNet) и рекуррентной графовой нейронной сети с механизмом внимания (TGCN-A).

Показано, что за счет более точного описания в модели WRF подстилающей поверхности и предварительной обработки ее выходной продукции методом экспоненциально взвешенного скользящего среднего оправдываемость численных прогнозов температуры на сроки до 48 ч повышается на 1,0–4,4 %, а среднеквадратическая погрешность скорости ветра уменьшается на 0,1–0,2 м/с. Последующая коррекция прогнозов модели WRF с применением методов машинного обучения и нейронной сети дополнительно повышает оправдываемость численного прогноза температуры в среднем на 3,2 %, а также уменьшает среднеквадратические погрешности прогнозов приземного давления и скорости ветра на 0,20–0,74 гПа и 0,32–0,53 м/с соответственно.

Ключевые слова: численный прогноз погоды; мезомасштабная модель; валидация моделей; оправдываемость прогноза; коррекция систематических ошибок; машинное обучение.

Для цитирования. Лысенко С. А., Юдыцкая К. С. Коррекция ошибок мезомасштабного численного прогноза погоды методами машинного обучения // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 5–18.

**ERROR CORRECTION OF MESOSCALE NUMERICAL WEATHER FORECAST
BY MACHINE LEARNING METHODS****S. A. Lysenko, K. S. Yudytskaya***Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

Abstract. The metrics of success of short-term numerical weather forecasts for the territory of Belarus based on the mesoscale hydrodynamic model of the atmosphere WRF (Weather Research and Forecasting) with regionally adapted block of underlying surface modelling are analyzed. The efficiency of systematic error correction of numerical forecasts of surface meteorological parameters using the method of exponentially weighted moving average and Kalman filter is evaluated.

A method of increasing the validity of mesoscale numerical forecasts has been proposed, in which corrections to the prognostic fields of meteorological parameters are calculated using machine learning models, and predictors are forecasts of several global and regional hydrodynamic models of the atmosphere. A comparative analysis of the efficiency of correction of numerical forecasts using machine learning models (XGBoost and ElasticNet) and recurrent graph neural network with attention mechanism (TGCN-A) was carried out.

It is shown that due to a more accurate description of the underlying surface in the WRF model and preliminary processing of its output by the exponentially weighted moving average method, the validity of numerical temperature forecasts for periods up to 48 h increases by 1.0–4.4 %, and the mean square error of wind speed decreases by 0.1–0.2 m/s.

Subsequent correction of WRF model forecasts using machine learning and neural network methods additionally increases the validity of numerical temperature forecasts by 3,2 % on average, and also reduces the RMS errors of surface pressure and wind speed forecasts by 0.20–0.74 hPa and 0.32–0.53 m/s, respectively.

Keywords: numerical weather forecast; mesoscale model; model validation; forecast accuracy; correction of systematic errors; machine learning.

For citation. Lysenko S. A., Yudytskaya K. S. Error correction of mesoscale numerical weather forecast by machine learning methods. *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 5–18.

Введение. Численные прогнозы погоды являются основой современной метеорологии, предоставляя подробные предсказания атмосферных условий на период до 10 дней. Такие прогнозы разрабатываются на основе компьютерных моделей (гидродинамических моделей атмосферы), описывающих физические процессы в атмосфере с учетом текущих метеорологических данных (от метеостанций, метеорологических спутников и зондов). Однако, несмотря на постоянные улучшения моделей, они все еще содержат систематические ошибки и смещения, обусловленные неидеальным описанием атмосферных процессов и подстилающей поверхности, неточными начальными условиями и ограниченными вычислительными ресурсами. В связи с этим необходимым этапом формирования численного прогноза погоды является статистическая обработка (постпроцессинг) выходной продукции гидродинамической модели с учетом ошибок ее прогнозов за некоторый предыдущий период.

В простейшем случае обработка численных прогнозов погоды сводится к коррекции их систематических ошибок для пунктов метеорологических наблюдений с использованием метода экспоненциально взвешенного скользящего среднего или фильтра Калмана [1–3]. В более сложных алгоритмах коррекция численных прогнозов погоды осуществляется с применением методов машинного обучения или нейронных сетей [4, 5].

При известных поправках к прогнозам численной модели для пунктов наблюдений коррекция прогнозных полей приземных метеорологических параметров может осуществляться с применением хорошо отработанных на практике методов объективного анализа, включая методы оптимальной интерполяции и вариационного усвоения данных [6, 7].

В нашем случае целью работы являлось повышение точности прогнозов мезомасштабной численной модели атмосферы WRF (Weather Research and Forecasting) Национального центра атмосферных исследований США (NCAR), применяемой в Беларуси для региональной локализации прогнозов глобальных гидродинамических моделей атмосферы.

Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (Белгидромет) разрабатывает ежедневные прогнозы погоды на основе WRF для территории Беларуси. Эти прогнозы в настоящее время не являются официальным прогнозом Белгидромета и носят консультативный характер, поскольку рассчитываются автоматически, без контроля и корректировки специалистом.

Система численного прогноза погоды WRF, используемая в Белгидромете, имеет пространственное разрешение для территории Европы – 15 км и для территории Беларуси – 3 км. Начальные и граничные условия получают из глобальной модели GFS (Global Forecast System) Национального центра прогнозирования состояния окружающей среды США (NCEP). В системе WRF производится ассимиляция данных радиозондирования и результатов наблюдений на метеостанциях [8].

Институтом природопользования НАН Беларуси совместно с Белгидрометом в 2021–2023 гг. реализована ассимиляция в модель WRF данных радиоакустического и микроволнового зондирования (SODAR/RASS) профилей ветра и температуры в пограничном слое атмосферы с детектированием аномалий и коррекцией систематических ошибок в ассимилируемых данных. В 2022 г. в опытную эксплуатацию внедрена разработанная информационная система «Автоматизированный программный комплекс контроля, подготовки и ассимиляции в численную модель прогноза погоды WRF-ARW геофизических данных о подстилающей поверхности по европейской территории», использующая новую цифровую модель подстилающей поверхности, построенную на актуальных данных спутниковых систем наблюдения MODIS, AVHRR и PROBA-V, а также предусматривающая использование оперативных спутниковых данных для уточнения параметров почвенно-растительного покрова – листового индекса, доли поглощаемой фотосинтетически активной радиации, альбедо, снежного покрова и др. Согласно предварительным оценкам, выполненным за зимний период 2022–2023 гг., уточнение параметров подстилающей поверхности на основе спутниковых данных позволило сократить среднеквадратическую погрешность прогноза приземной температуры воздуха для сроков до +48 ч на 0,17–0,31 °C в сравнении с базовым прогнозом WRF [9, 10].

Белгидромет в рамках международного метеорологического консорциума также имеет доступ к выходной продукции некоторых глобальных и региональных систем численного прогнозирования погоды. К ним относятся системы GFS (США), UKMO (Великобритания), ICON (Германия) и COSMO (Россия). В настоящее время данные модели используются в Белгидромете только для ежедневной верификации

краткосрочных численных прогнозов путем их сопоставления с наблюдениями. Одновременно с этим доступ к выходной продукции глобальных моделей открывает возможность для уточнения мезомасштабных прогнозов для территории Беларуси, поскольку поправки к прогностическим полям метеорологических параметров могут вычисляться с использованием моделей машинного обучения, в которых предикторами выступают прогнозы глобальных и региональных гидродинамических моделей атмосферы.

В настоящей работе анализируются метрики успешности прогнозов модели WRF в исходной и модифицированной конфигурации, а также оценивается эффективность применения различных методов постпроцессинга численных прогнозов погоды, включая корректировку систематических погрешностей и комплексирование прогнозов глобальных и региональных моделей методами машинного обучения.

Коррекция систематических ошибок численных прогнозов погоды. Первым этапом постпроцессинга выходной продукции численной гидродинамической модели атмосферы является коррекция ее систематических ошибок на основе наблюдений на метеостанциях за некоторый предшествующий период. Для этой цели может использоваться широкий набор известных методов прогнозирования временных рядов – от наиболее простого метода экспоненциально взвешенного скользящего среднего EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) до моделей глубокого машинного обучения. Для решения отмеченной задачи нами применены два метода – EWMA и фильтр Калмана, наименее затратные в вычислительном плане и хорошо работающие при наличии пропусков во временных рядах наблюдений или прогнозов.

Экспоненциально взвешенное скользящее среднее – это средневзвешенное значение функции в скользящем окне с экспоненциально убывающими весами. EWMA вычисляется по рекурсивной формуле

$$EWMA_t = \alpha p_t + (1 - \alpha) \cdot EWMA_{t-1}, \quad (1)$$

где $EWMA_t$ – значение экспоненциального скользящего среднего в точке t (последнее значение, в случае временного ряда); α – коэффициент сглаживания, характеризующий скорость уменьшения весов (чем меньше его значение, тем больше влияние предыдущих значений на текущую величину среднего); p_t – значение исходной функции в момент времени t ; $EWMA_{t-1}$ – предыдущее значение экспоненциального скользящего среднего.

В решаемой задаче коррекции численных прогнозов приземных метеорологических параметров на территории Беларуси наилучшие результаты показал вариант EWMA с периодом усреднения $T = 10$ дней и коэффициентом сглаживания $\alpha = 0,2$. При этом важно отметить, что коррекцию систематических ошибок производили отдельно для каждой заблаговременности прогноза с учетом предыдущих десяти прогнозов аналогичной заблаговременности.

Фильтр Калмана является оптимальным алгоритмом фильтрации параметров динамической линейной системы при наличии неполных и зашумленных наблюдений. Ключевая идея фильтра Калмана в задаче прогноза временных рядов состоит в рекурсивном вычислении поправки к прогнозу модели динамической системы на один шаг вперед с учетом оценок ковариационной матрицы состояния системы и ковариационной матрицы ошибок модели, полученных на предыдущих шагах. Если неопределенность вектора состояния системы выше, чем ошибка модели, то фильтр будет выбирать значения ближе к данным моделирования, в противном случае фильтр будет больше «доверять» оценкам предыдущего состояния системы.

В решаемой нами задаче фильтр Калмана выражает систематическую ошибку прогноза модели $\hat{\mathbf{x}}_t$ в момент времени t в виде суммы оценок ошибки прогноза $\hat{\mathbf{x}}_{t-\Delta t}$ на предыдущем временном шаге $t - \Delta t$ и шума моделируемой системы $\mathbf{w}_t$:

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \hat{\mathbf{x}}_{t-\Delta t} + \mathbf{w}_t. \quad (2)$$

Фактическая ошибка прогноза модели $\mathbf{y}_t$ (разница между наблюдением и прогнозом) включает как систематическую $\mathbf{x}_t$, так и случайную $\mathbf{v}_t$ составляющие:

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{x}_{t-\Delta t} + \mathbf{v}_t. \quad (3)$$

Предполагается, что случайные векторы шума системы $\mathbf{w}_t$ и шума прогноза модели $\mathbf{v}_t$ независимы и подчиняются нормальному распределению с нулевым математическим ожиданием.

Обновление систематической ошибки прогноза модели с учетом вновь полученного наблюдения выполняется путем прибавления к $\mathbf{x}_{t-\Delta t}$ вектора невязки прогноза и наблюдения, пропущенного через линейный фильтр Калмана:

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \hat{\mathbf{x}}_{t-\Delta t} + \mathbf{K}_t (\mathbf{y}_t - \hat{\mathbf{x}}_{t-\Delta t}). \quad (4)$$

где матрица $\mathbf{K}_t$, называемая оптимальной матрицей коэффициентов усиления Калмана, минимизирует среднеквадратичную ошибку $E[(\hat{\mathbf{x}}_t - \mathbf{x}_t)^2]$.

Как показано Р. Э. Калманом в работе [2], посвященной рекурсивному решению задачи линейной фильтрации дискретных сигналов, оптимальная матрица коэффициентов усиления в формуле (4) задается следующими выражениями:

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{t/t-\Delta t} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{t/t-\Delta t} \mathbf{H}^T + \mathbf{V}_t)^{-1}, \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_{t/t-\Delta t} = \mathbf{P}_{t-\Delta t} \mathbf{W}_t, \quad (6)$$

где $\mathbf{P}_t$ – оценка матрицы дисперсии вектора систематической ошибки; $\mathbf{H}$ – матрица наблюдения, которая в нашем случае является единичной матрицей; $\mathbf{V}_t$ – матрица дисперсий шума наблюдения; $\mathbf{W}_t = E[\mathbf{w}_t^T \mathbf{w}_t]$ – матрица дисперсий шума системы.

Формулы (4) и (5) показывают, что поправка систематической ошибки прогноза тем значительнее, чем больше дисперсия шума системы и меньше дисперсия шума наблюдения.

Матрица дисперсии систематической ошибки инициализируется до начала процесса фильтрации и далее обновляется на каждом шаге экстраполяции по формуле

$$\mathbf{P}_t = (1 - \mathbf{K}_t \mathbf{H}) \cdot \mathbf{P}_{t/t-\Delta t}. \quad (7)$$

В связи с быстрой сходимостью алгоритма выбор начальных значений $\hat{\mathbf{x}}_0$ и $\mathbf{P}_0$ практически не влияет на результаты оценок систематической ошибки прогноза. В то же время результаты работы алгоритма сильно подвержены влиянию матриц $\mathbf{V}_t$ и $\mathbf{W}_t$, характеризующих шум системы и наблюдений. В работах, посвященных применению фильтра Калмана для коррекции численных прогнозов приземной температуры воздуха и скорости ветра, элементы матриц $\mathbf{V}_t$ и $\mathbf{W}_t$ предлагается вычислять на основе последних N полученных оценок $\mathbf{w}_t = \hat{\mathbf{x}}_t - \hat{\mathbf{x}}_{t-\Delta t}$ и $\mathbf{v}_t = \mathbf{y}_t - \hat{\mathbf{x}}_t$. Для их вычисления нами использованы данные наблюдений и прогнозы модели за предыдущие 10 дней.

Основой для валидации численных прогнозов погоды стали данные 60 пунктов метеорологических наблюдений на территории Беларуси и архивы прогнозов гидродинамических моделей атмосферы (глобальных – GFS, UKMO, ICON; региональной – COSMO; мезомасштабной – WRF) за период с 01.03.2023 по 12.09.2025, официально предоставленные Институту природопользования НАН Беларуси Белгидрометом в рамках выполнения этапа освоения результатов НИОК(Т)Р «Разработать, испытать и освоить автоматизированную систему повышения точности численных прогнозов погоды на территории Беларуси на основе модели WRF-ARW с использованием данных спутникового и наземного дистанционного зондирования».

На рис. 1 представлены оценки средних систематических ошибок прогнозов приземной температуры и скорости ветра моделью WRF с пространственным разрешением 3 км на сроки от 6 до 48 ч для 60 метеорологических станций Беларуси. Систематическая ошибка численного прогноза температуры для разных пунктов на территории Беларуси изменяется в диапазоне от -1°C до $+1^\circ\text{C}$. Систематическая ошибка численного прогноза не является постоянной, а в зависимости от атмосферных условий, времени года и времени суток может меняться как по величине, так и по знаку. По этой причине коррекция систематических ошибок численного прогноза должна осуществляться каждый раз перед его предоставлением конечным потребителям.

Сопоставление численных прогнозов WRF с наблюдениями также показывает, что данная модель существенно завышает значение скорости ветра на высоте 10 м. На рис. 1, б цветом показана величина средней систематической ошибки краткосрочного численного прогноза скорости ветра на станциях метеорологической сети Республики Беларусь (разница между наблюдением и прогнозом). Средняя величина систематической ошибки прогноза скорости ветра составляет 2,0 м/с, а на отдельных станциях (Сенно, Вилейка, Мозырь) она превышает 3 м/с.

На рис. 2 представлены оценки среднеквадратических ошибок (RMSE) численных прогнозов приземных метеопараметров – температуры, давления и скорости ветра – моделью WRF с разрешением 3 км. Оценки получены на основе данных всех 60 метеостанций Беларуси и агрегированы в зависимости от заблаговременности прогноза. Расчеты выполнены для случаев, когда для прогноза используются необработанные выходные данные WRF и когда они проходят обработку фильтром Калмана и методом EWMA.

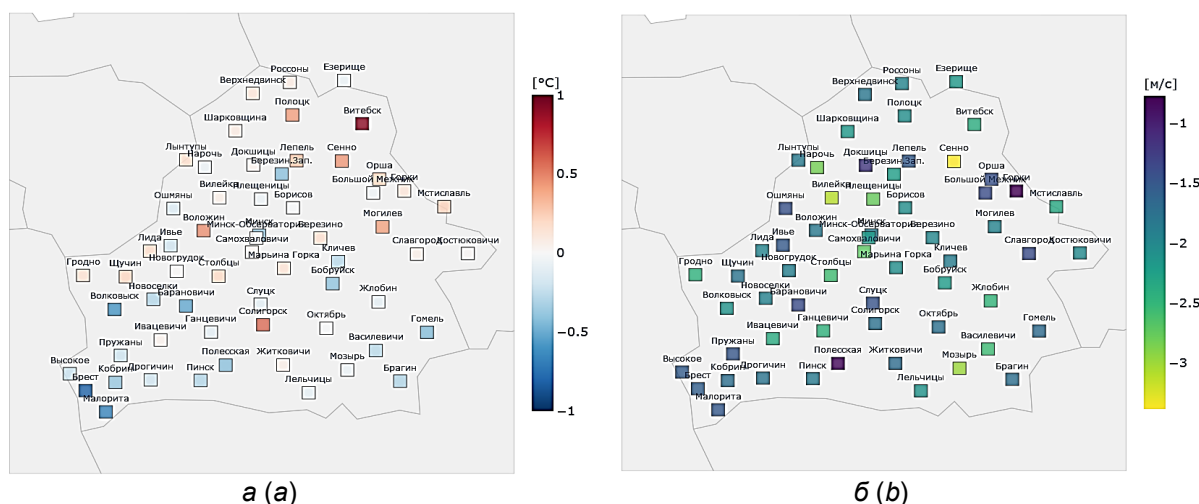


Рис. 1. Систематические ошибки численных прогнозов приземной температуры (а) и скорости ветра (б) моделью WRF (разрешение 3 км) с заблаговременностью до 48 ч для 60 пунктов метеорологических наблюдений

Fig. 1. Systematic errors of numerical forecasts of surface temperature (a) and wind speed (b) by the WRF model (3 km resolution) with a lead time up to 48 hours for 60 meteorological stations

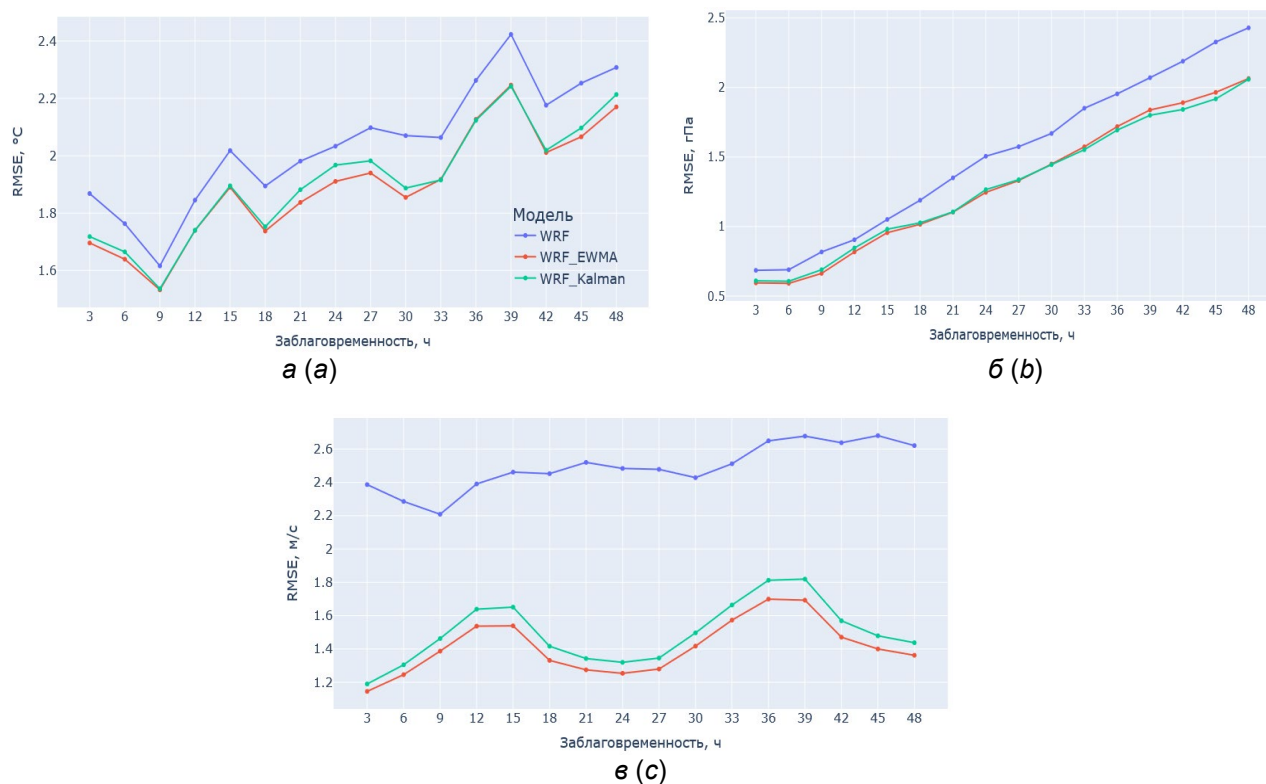


Рис. 2. Среднеквадратические ошибки численных прогнозов для территории Беларуси температуры воздуха на высоте 2 м (а), приземного давления (б) и скорости ветра на высоте 10 м (в) в зависимости от заблаговременности прогноза до и после коррекции систематических ошибок фильтром Калмана и методом EWMA (используемая модель – WRF с разрешением 3 км, срок составления прогноза – 00 UTC)

Fig. 2. Root-mean-square errors of numerical forecasts for the territory of Belarus of air temperature at 2 m height (a), surface pressure (b) and wind speed at 10 m height (c) as a function of the forecast advance before and after correction of systematic errors by Kalman filter and EWMA method (the model used is WRF with a resolution of 3 km, the forecast time is 00 UTC)

Исходные численные прогнозы приземных метеопараметров содержат значительную систематическую ошибку, которая различается для разных заблаговременностей. Использование стандартных методов ее коррекции уменьшает RMSE прогноза температуры на величину до 0,22 °C, давления – до 0,36 гПа, скорости ветра – до 1,28 м/с. При этом из двух рассмотренных методов коррекции систематической ошибки лучшие результаты показывает EWMA. В связи с этим данный метод выбран нами в качестве основного метода первичной постобработки численных прогнозов погоды для пунктов метеорологических наблюдений на территории Беларуси.

Метрики успешности численных прогнозов приземных метеопараметров. В ходе выполнения проекта по адаптации мезомасштабной модели WRF к территории Беларуси и ассимиляции в нее данных дистанционного зондирования было разработано три экспериментальных варианта системы регионального численного прогнозирования погоды, основанных на модели WRF, которые введены в опытную эксплуатацию в Белгидромете в марте 2023 г. Мезомасштабные прогнозы приземных метеопараметров выпускаются специалистами Белгидромета 2 раза в сутки (в 00 ч и 12 ч UTC) и интерполируются на координаты метеостанций для последующей валидации качества прогнозов. Сопоставление численных прогнозов с данными наблюдений за более чем двухлетний период позволило оценить метрики успешности прогнозов разной заблаговременности.

Валидацию прогнозов проводили для следующих вариантов системы мезомасштабного численного моделирования погоды: WRF_15 и WRF_3 – базовая модель WRF в стандартной конфигурации с пространственным разрешением 15 и 3 км соответственно; WRF_GEO – модель WRF с разрешением 3 км и усовершенствованным блоком моделирования подстилающей поверхности (актуализирована структура землепользования, уточнены пространственные распределения листового индекса, поглощаемой фотосинтетически активной радиации, альбеда почвы и снежного покрова для каждого месяца); WRF_EXP_15 и WRF_EXP_3 – системы прогнозирования с той же цифровой моделью подстилающей поверхности, что и в WRF_GEO, но с динамическим уточнением параметров подстилающей поверхности на основе оперативных данных дистанционного зондирования Земли. Прогнозы всех моделей предварительно проходили стадию коррекции систематических ошибок методом EWMA.

Результаты валидации краткосрочных прогнозов модели WRF в пяти ее различных конфигурациях представлены на рис. 3. Для сравнения качества прогнозов использовали среднеквадратическую погрешность (RMSE), полученную по данным 60 пунктов наблюдений на территории Беларуси за период с 01.03.2023 по 12.09.2025.

С целью объективного сравнения точности прогнозов моделей для каждого пункта наблюдения производили отбор дат, на которые имеются данные наблюдений и прогнозы всех сравниваемых моделей. Среднеквадратическую погрешность прогноза каждой модели оценивали отдельно для каждой заблаговременности на основании сравнения прогнозов с наблюдениями по всем метеорологическим станциям за весь анализируемый период. Оценку средней оправдываемости прогноза температуры воздуха также производили путем сравнения фактической и спрогнозированной температур на всех станциях за весь анализируемый период. При этом в соответствии с ТКП 17.10-06-2008, если отклонение фактической температуры от прогнозируемой составляло менее 3 °C, то прогноз температуры на заданные дату и час считали оправдавшимся на 100 %, при отклонении 3–4 °C – оправдавшимся на 50 %, при большем отклонении – неоправдавшимся.

По результатам эксперимента сравнения моделей лучшие результаты прогноза приземной температуры показала модель WRF_GEO. Следующими по точности идут прогнозы WRF_EXP_3 и WRF_EXP_15. В сравнении с базовыми прогнозами WRF_15 и WRF_3 средняя абсолютная ошибка прогноза температуры за счет уточнения параметров подстилающей поверхности уменьшается на величину от 0,2 до 0,7 °C. Оправдываемость прогноза температуры по ТКП на первый день повышается на 1,0–2,5 %, а на второй – на 2,7–4,4 %.

Оценки RMSE мезомасштабных прогнозов приземного давления, представленные на рис. 3, б, отчетливо демонстрируют тенденцию повышения точности численных прогнозов поля давления в результате увеличения пространственного разрешения гидродинамической модели атмосферы и уточнения физических параметров подстилающей поверхности. Явным лидером в прогнозе приземного давления является модель WRF_GEO с уточненными среднемесячными значениями физических параметров подстилающей поверхности. При этом использование оперативных спутниковых данных для уточнения физических параметров подстилающей поверхности (WRF_EXP_3 и WRF_EXP_15) не привело к дополнительному повышению точности прогнозов.

Результаты валидации мезомасштабных численных прогнозов также показывают, что увеличение пространственного разрешения модели несущественно сказывается на качестве прогноза поля скорости ветра на высоте 10 м (рис. 3, в). Это обстоятельство, по-видимому, связано с тем, что для мезомасштабного прогнозирования скорости ветра в отдельно взятом регионе первостепенное значение имеет качество исходного прогноза общих синоптических условий, определяющих текущее и будущее

состояния атмосферы. Для прогнозирования глобальной погоды нами использована модель GFS (Global Forecast System) Национального центра прогнозирования окружающей среды (NCEP) США, имеющая пространственное разрешение для территории Беларуси около 22 км. Повышение детальности этого прогноза с применением мезомасштабной модели WRF может достигаться лишь за счет более точного учета физико-географических особенностей региона, а не за счет дальнейшего искусственного увеличения горизонтального разрешения. Это предположение подтверждается оценками RMSE скорости ветра, представленными на рис. 3, в, из которых видно, как уточнение физических параметров подстилающей поверхности сказывается на качестве прогноза: RMSE уменьшается на 0,1–0,2 м/с. Физически это достигается за счет более точного описания в моделях WRF_GEO, WRF_EXP_15 и WRF_EXP_3 турбулентных потоков тепла, влаги и импульса с подстилающей поверхности и связанных с ними процессов в атмосферном пограничном слое.

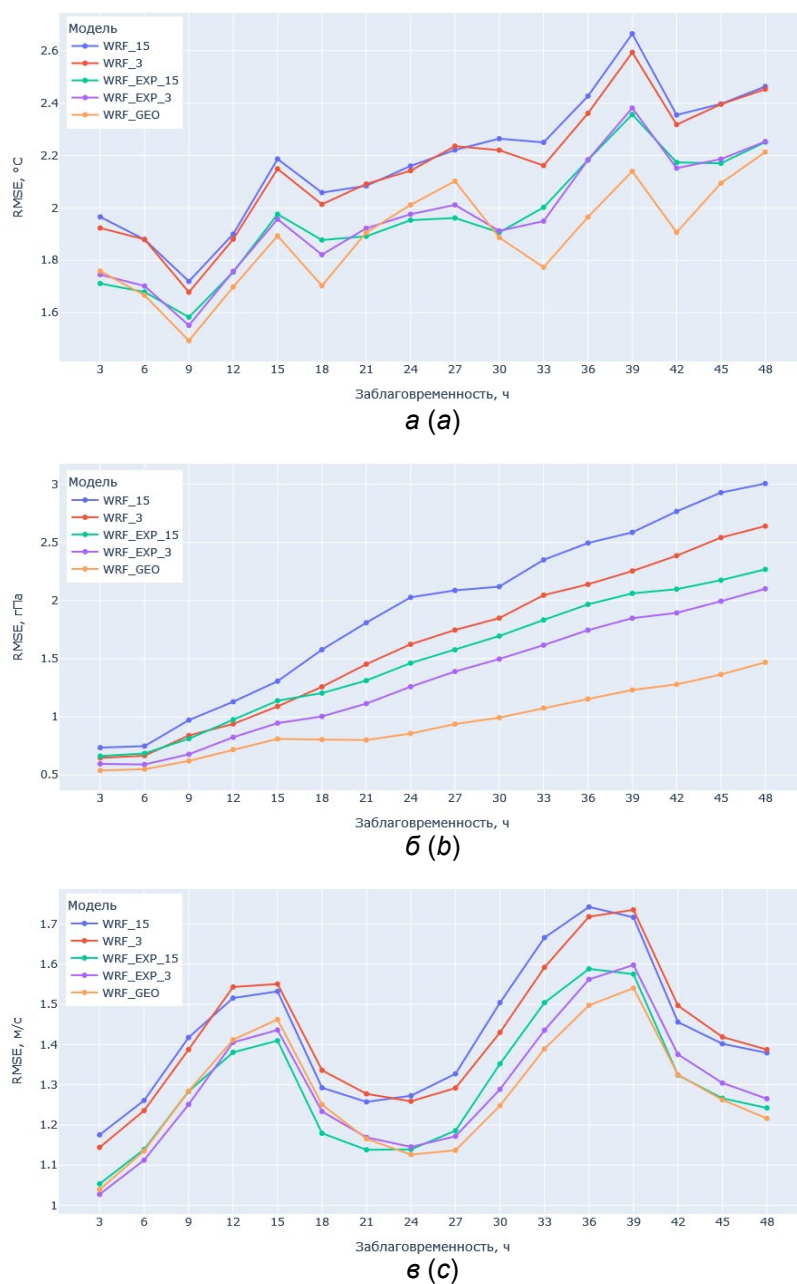


Рис. 3. Среднеквадратические ошибки численных прогнозов приземной температуры воздуха (а), приземного давления (б) и скорости ветра на высоте 10 м (в) в зависимости от заблаговременности прогноза при разных конфигурациях модели WRF

Fig. 3. RMS errors of numerical forecasts of surface air temperature (a), surface pressure (b) and wind speed at a height of 10 m (c) as a function of forecast advance under different WRF model configurations

В целом по результатам валидации численных прогнозов температуры, давления и скорости ветра можно сделать вывод, что наиболее эффективным вариантом мезомасштабного прогноза погоды для территории Беларуси является прогноз WRF_GEO. Увеличение пространственного разрешения модели с 15 до 3 км слабо сказывается на ошибках прогноза температуры и скорости ветра, однако повышает точность прогноза приземного давления. Более точное представление в модели WRF подстилающей поверхности позволило повысить оправдываемость прогнозов температуры на срок до 48 ч на 1,0–4,4 %, а также уменьшить среднеквадратические ошибки прогнозов давления и скорости ветра. При этом использование оперативных спутниковых данных для уточнения физических параметров подстилающей поверхности не приводит к повышению точности численных прогнозов погоды по сравнению с использованием средних значений параметров для каждого месяца. Гораздо большее значение для точности мезомасштабных прогнозов WRF имеет качество исходных данных, в частности, качество прогнозов глобальной модели, используемой для задания начальных и граничных условий при решении системы прогностических уравнений термогидродинамики атмосферы.

Коррекция численных прогнозов погоды методами машинного обучения. С целью дальнейшего повышения качества выходной продукции мезомасштабной модели WRF предпринята попытка скорректировать ее прогнозы методами машинного обучения. В качестве базового прогноза использовали прогноз WRF_GEO, показавший наибольшую оправдываемость для большинства сроков. Предикторами поправок к прогнозам WRF_GEO служили прогнозы глобальных и региональных моделей, к которым Белгидромет имеет доступ в рамках международного метеорологического консорциума: модели ICON (Германия), UKMO (Великобритания), COSMO (Россия) и GFS (США). Помимо этого использовали вспомогательные данные о типе подстилающей поверхности, рельефе и географических координатах пунктов метеорологических наблюдений. Для описания подстилающей поверхности использовали классификацию почвенно-растительного покрова Global Land Cover 2019 (GLC2019) с пространственным разрешением 100 м на основе результатов обработки данных спутникового сканера высокого спектрального разрешения PROBA-V Европейского Космического Агентства.

Поправку к прогнозу WRF_GEO вычисляли несколькими методами: моделями машинного обучения – XGBoost (градиентный бустинг) и ElasticNet (линейная регрессия с регуляризацией по типу L1 и L2 для обработки мультиколлинеарности предикторов), а также с использованием рекуррентной графовой нейронной сети для обработки временных данных, представленных в виде графа (сеть метеостанций). Целью исследований было сопоставить эффективность коррекции мезомасштабного прогноза погоды с применением современных методов машинного обучения и искусственного интеллекта, а также выработать рекомендации по выбору технологической схемы составления численного прогноза для разных метеопараметров и разной заблаговременности. Ниже дано краткое описание примененных методов.

Эластичная сеть (ElasticNet) – это метод регуляризованной регрессии, который устанавливает штрафы (регуляризацию) при выборе весовых коэффициентов перед предикторами по типу L1 (сумма модулей коэффициентов) и L2 (сумма квадратов коэффициентов), что обеспечивает более стабильную и гибкую регрессию. L1-регуляризация обнуляет коэффициенты наименее значимых признаков, что позволяет выполнять автоматический отбор признаков и делает модель более интерпретируемой. L2-регуляризация уменьшает величину коэффициентов, распределяя их влияние на все предикторы, что помогает при наличии сильно коррелированных предикторов.

ElasticNet имеет два основных параметра, которые регулируют баланс между L1 и L2 штрафами: λ – общая сила регуляризации; α – отношение смеси L1- и L2-регуляризаций. Функция потерь ElasticNet выглядит следующим образом:

$$\min_{\beta_0, \beta} \left(\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (y_i - \beta_0 - \mathbf{x}_i^T \beta)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p \left(\alpha |\beta_j| + \frac{1-\alpha}{2} \beta_j^2 \right) \right), \quad (8)$$

где β_0 и $\beta = (\beta_j)$ – искомые параметры модели, первый из которых является скаляром, а второй – вектором из p значений; N – количество наблюдений; y_i – прогнозируемая переменная; $\mathbf{x}_i$ – вектор из p предикторов для i -го наблюдения. Первый член в выражении (8) – это стандартная сумма квадратов остатков для линейной регрессии; второй – это L1-штраф, который обнуляет коэффициенты; третий – это L2-штраф, который уменьшает коэффициенты.

XGBoost (Extreme Gradient Boosting) – это высокоэффективный и масштабируемый алгоритм машинного обучения, основанный на концепции градиентного бустинга. Он использует ансамбль слабых предсказателей, обычно деревьев решений, чтобы создать одну сильную и точную модель. Основная идея бустинга заключается в том, чтобы последовательно обучать новые модели, каждая из которых пытается исправить ошибки, допущенные предыдущими моделями. XGBoost значительно улучшает этот процесс за счет ряда оптимизаций, которые делают его одним из самых популярных и мощных алгоритмов для работы с табличными данными.

В алгоритме XGBoost на каждом шаге t обучения очередной модели оптимизируется следующая целевая функция:

$$L^{(t)} = \sum_{i=1}^N l\left(\mathbf{y}_i, \hat{\mathbf{y}}_i^{(t-1)} + \mathbf{f}_t(\mathbf{x}_i)\right) + \Omega(\mathbf{f}_t), \quad (9)$$

где l – функция потерь (невязка), показывающая насколько хорошо модель соответствует экспериментальным данным; $\mathbf{y}_i$ и $\hat{\mathbf{y}}_i^{(t-1)}$ – значение i -го элемента обучающей выборки и сумма предсказаний первых $(t-1)$ моделей соответственно; $\mathbf{x}_i$ – набор признаков i -го элемента обучающей выборки; $\mathbf{f}_t$ – модель, которую мы хотим обучить на шаге t ; $\mathbf{f}_t(\mathbf{x}_i)$ – предсказание t -й модели на i -м элементе обучающей выборки; $\Omega(\mathbf{f}_t)$ – функция регуляризации, ограничивающая сложность модели.

Для дерева решений функция

$$\Omega(\mathbf{f}_t) = \alpha T + \frac{1}{2} \lambda \|\mathbf{w}\|^2, \quad (10)$$

где α и λ – параметры регуляризации; T – количество вершин в дереве; $\mathbf{w}$ – вектор оценок в листьях дерева.

Важными достоинствами моделей ElasticNet и XGBoost по сравнению с нейронными сетями являются их высокая экономичность в плане вычислительных затрат, быстрота обучения и интерпретируемость. В нашем алгоритме коррекции ошибок численных прогнозов погоды эти модели обучаются на скользящем 20-дневном окне, предшествующем моменту составления численного прогноза. При этом для каждой заблаговременности прогноза используется своя отдельная модель ElasticNet или XGBoost, обученная на прогнозах именно этой заблаговременности и данных наблюдений за прошедшие дни. Длина скользящего временного окна, на котором обучаются модели ElasticNet или XGBoost, примерно соответствует теоретическому пределу предсказуемости погоды, когда начальное состояние атмосферы еще не утрачивает влияния на последующее развитие атмосферных процессов.

Учитывая, что значимость данных для обучения моделей падает по мере увеличения интервала Δt между моментом получения и моментом составления прогноза, в алгоритм обучения моделей введен экспоненциальный коэффициент инфляции $y = \exp(-\Delta t / \tau_0)$, в котором время затухания τ_0 выбирают на основе анализа автокорреляционной функции прогнозируемого метеорологического параметра.

Модель *Temporal Graph Convolutional Network with Attention (TGCN-A)* – это гибридная нейросетевая архитектура, предназначенная для совместного улавливания пространственных и временных зависимостей в данных, в частности, для предсказания метеорологических значений на сети станций. Модель интегрирует следующие ключевые компоненты: 1) временные (рекуррентные) графовые свертки (T-GCN) [11] для учета пространственно-временных зависимостей; 2) механизм внимания для взвешивания значимости временных шагов; 3) Residual Connection (обходное соединение) для решения проблемы «исчезающих градиентов» в глубоких нейросетях и улучшения обучения модели.

На рис. 4 показан граф, образованный сетью метеостанций Беларуси. Ребра, соединяющие вершины графа, устанавливают связи между станциями, которые учитывают при корректировке численных прогнозов погоды. Каждому узлу графа присваивают начальное векторное представление (эмбединг) его собственных признаков, включающих прогнозы численных моделей (COSMO, GFS, ICON, UKMO, WRF) на будущий срок и прогнозы за предыдущие 7 дней той же заблаговременности, данные наблюдений на начальный момент прогноза и за предыдущие 7 дней, а также ряд вспомогательных данных: заблаговременность прогноза, день года, час суток, угол склонения, зенитный угол Солнца, долготу, широту и высоту местности, тип подстилающей поверхности в классификации GLC2019.

Ключевым компонентом модели TGCN-A является блок Temporal Graph Convolution (T-GCN), объединяющий спектральную графовую свертку на основе аппроксимирующих фильтров Чебышева и рекуррентную сеть GRU (Gated Recurrent Unit – управляемый рекуррентный блок) для временного моделирования [12]. При обработке каждого нового элемента временной последовательности рекуррентная сеть GRU обновляет свое скрытое состояние, учитывая как новый вход, так и предыдущее состояние. Рекуррентная графовая свертка обновляет представление узла графа, учитывая его непосредственных соседей. С каждым временным шагом узел «видит» все более далеких соседей (как и в обычной графовой свертке), но делает это с помощью механизма, который имеет память и может более избирательно накапливать информацию.

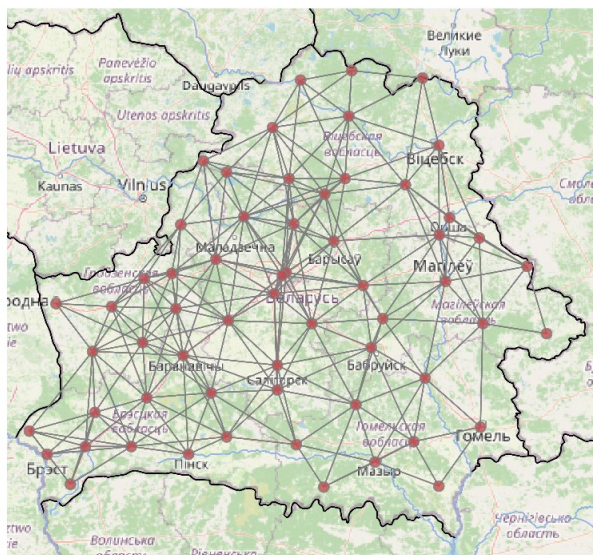


Рис. 4. Граф станций метеорологической сети:
вершины графа соответствуют метеостанциям, его ребра показывают связи между станциями, что учитывают при составлении численного прогноза погоды

Fig. 4. Graph of meteorological network stations:
the graph's vertices correspond to the meteorological stations, its edges show the connections between the stations that are taken into account when compiling a numerical weather forecast

В дополнение к T-GCN модель TGCN-A использует *механизм внимания (Attention)*, улучшающий работу с длинными временными последовательностями [13]. Вместо единственного скрытого состояния на выходе рекуррентного слоя T-GCN механизм внимания использует взвешенную сумму его скрытых состояний на каждом временном шаге. Для этого каждое скрытое состояние передается в *функцию согласования*, реализованную нами как обычный полносвязный слой с одним выходным узлом и функцией активации $\tanh$. Далее к согласованным значениям применяется функция softmax , преобразующая их в вероятностное распределение. Полученные вероятности умножаются на скрытые состояния рекуррентного слоя T-GCN и суммируются, чтобы получить вектор контекста, который в нашем случае является вектором поправки к прогнозам численных моделей погоды. Этот вектор прибавляется к прогнозам численных моделей для получения скорректированного прогноза, что реализовано за счет обходного соединения (*Residual connection*), передающего представление узлов графа на выход слоя внимания (*Attention*).

Модель TGCN-A обучалась на всем доступном временном ряду прогнозов и наблюдений на метеостанциях Беларуси с учетом общепринятого деления данных на обучающий, валидационный и тестовый наборы в процентном соотношении 60 : 20 : 20. Обучающие данные используют для непосредственного обучения модели. Валидационные данные позволяют осуществлять контроль переобучения модели путем остановки процесса обучения до того, как модель начнет ухудшать свои показатели. Тестовые данные используют один раз: для финальной оценки качества модели и симуляции ее реальной работы.

Модель TGCN-A разрабатывают отдельно для каждого метеопараметра, что повышает качество прогноза по сравнению с использованием одной универсальной модели с несколькими выходами для разных метеопараметров. На вход модели подается тензор размером $N \times F \times T$, где N – количество метеостанций, F – количество предикторов метеорологического прогноза, T – количество прогнозов заданной заблаговременности, учитываемых моделью (7 ретроспективных прогнозов и 1 прогноз на будущий срок).

На рис. 5 представлены оценки метрик успешности численных прогнозов глобальных и региональных моделей (COSMO, GFS, ICON, UKMO), региональной мезомасштабной модели WRF (вариант WRF_GEO) и гибридов мезомасштабной модели с методами машинного обучения (WRF + ElasticNet, WRF + XGBoost, WRF + TGCN-A). Оценки получены на том же тестовом наборе данных, который используется для контроля качества модели TGCN-A. Стоит отметить, что для моделей ElasticNet и XGBoost не требуется деления данных на обучающие и контрольные, поскольку данные модели обучаются каждый раз заново перед составлением нового прогноза, а метрики их качества оцениваются на новом прогнозе.

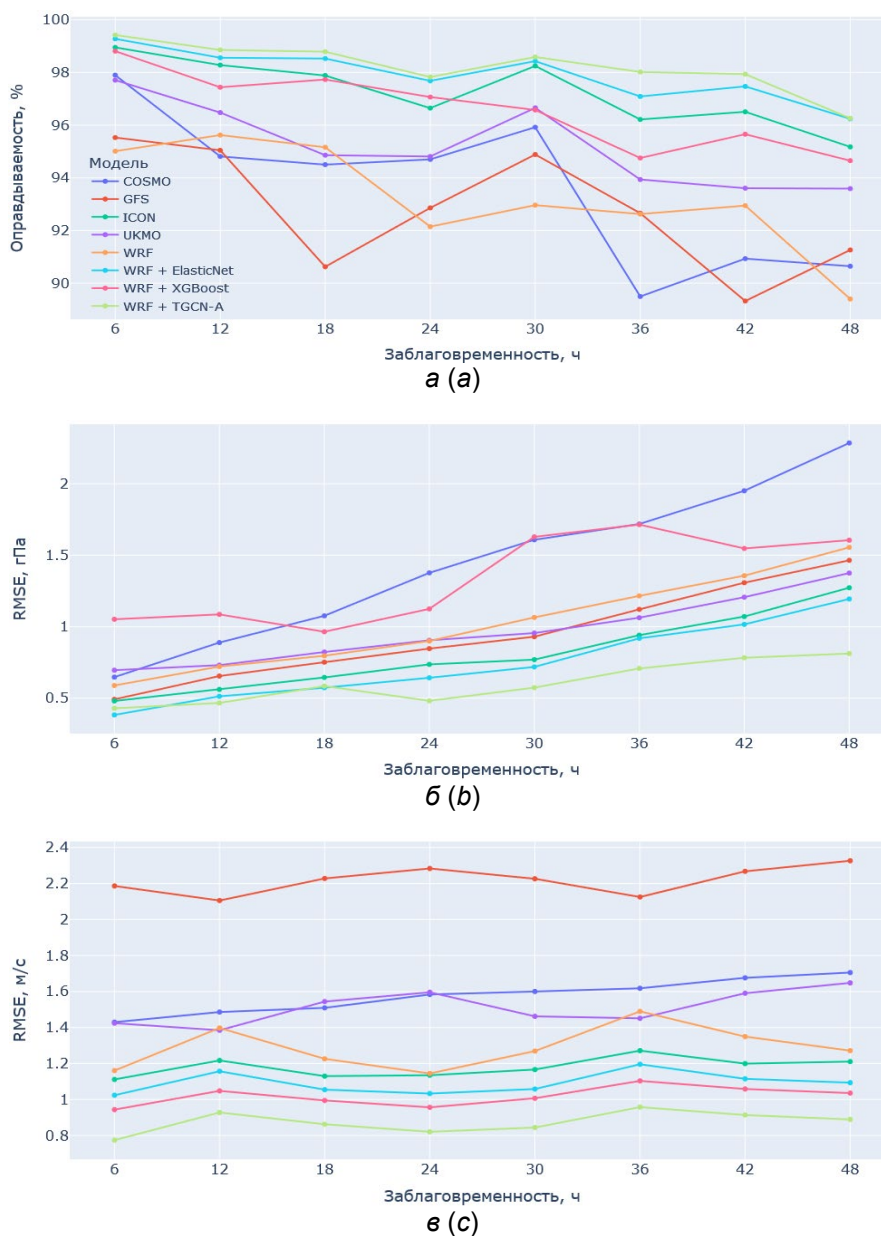


Рис. 5. Метрики успешности прогнозов разных моделей в зависимости от заблаговременности:
а – оправдываемость численного прогноза температуры воздуха на высоте 2 м;
б и **в** – среднеквадратические погрешности численных прогнозов приземного давления
и скорости ветра на высоте 10 м соответственно

Fig. 5. Metrics of success of forecasts of different models depending on the advance:
a – validity of numerical forecast of air temperature at a height of 2 m;
b and **c** – root-mean-square errors of numerical forecasts of surface pressure
and wind speed at a height of 10 m, respectively

Как следует из результатов сравнения метрик успешности прогнозов моделей, модель WRF в сочетании с нейросетью TGCN-A является безусловным лидером по оправдываемости прогнозов температуры воздуха: 99,4–97,8 % на первые сутки и 98,6–96,2 % на вторые сутки. Достаточно высокие результаты по оправдываемости прогнозов температуры показывает и вариант WRF с коррекцией ошибок при помощи ElasticNet (наиболее простая ML-модель). При этом вариант прогноза WRF с более сложным методом коррекции ошибок – XGBoost – по оправдываемости прогнозов температуры не превосходит лучшую модель из ансамбля рассматриваемых моделей – ICON (Германия). WRF + XGBoost находится на уровне лучшей модели ансамбля на первые сутки и значительно уступает ей по точности на вторые сутки прогнозного периода. В связи с этим для повышения точности прогнозирования температуры

воздуха на территории Беларуси можно рекомендовать использовать метод коррекции ошибок WRF, основанный на модели машинного обучения ElasticNet или рекуррентной графовой сети TGCN-A.

По точности прогнозов поля давления на территории Беларуси лидирующие позиции также занимают модели WRF + ElasticNet и WRF + TGCN-A, представляющие собой конвейеры регионально адаптированной мезомасштабной гидродинамической модели WRF_GEO и корректирующих их моделей машинного обучения – ElasticNet или TGCN-A. На первые сутки прогнозного периода прогнозы этих гибридных моделей сопоставимы по точности, на вторые сутки более точной является модель WRF + TGCN-A. С одной стороны, вариант прогноза WRF + XGBoost оказался одним из слабых в ансамбле рассматриваемых моделей. Возможно, это связано с тем, что модель XGBoost является гораздо более сложной по сравнению с моделью ElasticNet и для ее обучения необходимо использовать более длительный период (более 20 дней) или меньший коэффициент временной девальвации обучающих данных. С другой стороны, нейросетевая модель TGCN-A, обученная единожды, позволяет выполнять качественную коррекцию прогнозов давления с учетом всего лишь семи ближайших по времени ретроспективных прогнозов той же заблаговременности. Другим фактором, влияющим на качество обучения модели XGBoost, может являться наличие в ансамбле одной из моделей, которая резко отличается по точности (в худшую сторону) от всех остальных моделей, что далеко не всегда удается выявить на примере 20-дневного ретроспективного периода. Слабый прогноз создает «шум», усложняющий задачу обучения, и увеличивает дисперсию предсказаний ML-модели.

В рейтинге прогнозов моделей по скорости ветра первое место занимает гибридная модель WRF + TGCN-A, имеющая минимальную среднеквадратическую погрешность (RMSE) для всего прогнозного периода. Второе место в этом рейтинге занимает модель WRF + XGBoost, которая по точности прогноза скорости ветра стабильно превосходит все глобальные и региональные гидродинамические модели. Наличие в ансамбле гидродинамических моделей одного члена – модели GFS (США), ошибки прогнозов которого резко отличаются (в худшую сторону) от других моделей, в данном случае не привело к резкому падению точности обучаемой модели XGBoost, что может быть связано с высокой пространственной неоднородностью поля скорости ветра и большим разнообразием для него обучающих примеров по сравнению прогнозами поля давления и температуры.

Таким образом, применение методов машинного обучения для коррекции прогнозов регионально адаптированной мезомасштабной модели WRF позволяет повысить оправдываемость численного прогноза температуры на сроки от 6 до 48 ч в среднем на 3,2 % и уменьшить среднеквадратические погрешности прогнозов приземного давления и скорости ветра на 0,20–0,74 гПа и 0,32–0,53 м/с соответственно.

Следующим этапом постпроцессинга мезомасштабных прогнозов погоды должен стать численный анализ метеорологических полей на предмет усвоения в них уточненных данных для пунктов метеорологических наблюдений. Такой анализ может выполняться, например, с применением метода оптимальной интерполяции или вариационного усвоения данных. Результатом его должны стать скорректированные прогнозные поля приземных метеорологических параметров высокого разрешения, на основе которых можно будет формировать прогноз погоды для любого пункта на территории Беларуси.

Заключение. Результаты валидации численных прогнозов погоды на территории Беларуси за период с 01.03.2023 по 12.09.2025 показывают, что среди гидродинамических моделей, к прогнозам которых в настоящее время имеет доступ Белгидромет, наиболее точной по прогнозам температуры, давления и скорости ветра является глобальная модель ICON (Германия).

Прогнозы мезомасштабной региональной модели WRF содержат значительную систематическую ошибку по температуре, которая по ее оценкам для пунктов метеорологических наблюдений изменяется от $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также существенно завышают значение скорости ветра – на 1,0–3,5 м/с. Обработка численных прогнозов с применением метода экспоненциально взвешенного скользящего среднего, учитывающего ошибки прогноза модели в предыдущие 10 дней, позволяет практически полностью избавиться от этих систематических ошибок и уменьшить среднеквадратическую ошибку прогноза температуры на величину до 0,22 $^{\circ}\text{C}$, давления – до 0,36 гПа, скорости ветра – до 1,28 м/с.

Повышение пространственного разрешения модели WRF с 15 до 3 км практически не сказывается на точности прогнозирования температуры и скорости ветра, однако улучшает прогнозы давления. Более существенное влияние на прогнозы WRF оказывает качество цифровой модели подстилающей поверхности для целевого региона. Уточнение физических параметров подстилающей поверхности (листового индекса, альбедо, поглощаемой фотосинтетически активной радиации и др.) с использованием спутниковых данных позволяет повысить оправдываемость прогноза температуры на сроки до 48 ч на 1,0–4,4 % и уменьшить среднеквадратическую погрешность скорости ветра на 0,1–0,2 м/с. Данный эффект достигается за счет более точного описания в модели WRF турбулентных потоков тепла, влаги и импульса в атмосферном пограничном слое.

Для дальнейшего повышения точности мезомасштабных прогнозов погоды предложен алгоритм постпроцессинга при помощи моделей машинного обучения и нейронных сетей, учитывающих текущие прогнозы глобальных и региональных гидродинамических моделей и опыт их прогнозов в предыдущие дни. Применение для этой цели рекуррентной графовой нейронной сети позволяет дополнительно повысить оправдываемость численного прогноза температуры на сроки до 48 ч в среднем на 3,2 % и уменьшить среднеквадратические погрешности прогнозов приземного давления и скорости ветра на 0,20–0,74 гПа и 0,32–0,53 м/с соответственно.

Список использованных источников

1. Harvey, A. C. Time Series Models / A. C. Harvey. – 2nd ed. – New York : Harvester Wheatsheaf, 1993. – P. 179–198.
2. Kalman, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems / R. E. Kalman // *Journal of Basic Engineering*. – 1960. – Vol. 82. – P. 35–45.
3. Alerskans, E. Local temperature forecasts based on statistical post-processing of numerical weather prediction data / E. Alerskans, E. Kaas // *Meteorological Applications*. – 2021. – Vol. 28, № 4. – 21 p.
4. Быков, Ф. Л. Статистическая коррекция прогнозов погоды по модели COSMO с помощью нейронных сетей / Ф. Л. Быков // *Метеорология и гидрология*. – 2020. – № 3. – С. 5–20.
5. Statistical Postprocessing for Weather Forecasts: Review, Challenges, and Avenues in a Big Data World / S. Vannitsem [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2021. – Vol. 102, № 3. – P. E681–E699.
6. Bengtsson, L. Dynamic Meteorology: Data Assimilation Methods / L. Bengtsson, M. Ghil, E. Kallen. – New York : Springer-Verlag, 1981. – 330 p.
7. Lorenc, A. C. Analysis methods for numerical weather prediction / A. C. Lorenc // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 1986. – Vol. 112. – P. 1177–1194.
8. Формирование продукции систем негидростатического моделирования атмосферы COSMO-RuBy (Гидрометцентр России) и WRF-ARW (Белгидромет) для краткосрочного прогноза погоды / И. А. Розинкина [и др.] // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. – 2021. – № 4 (382). – С. 6–29.
9. Лысенко, С. А. Оценки влияния подстилающей поверхности на точность численного прогноза температуры воздуха на территории Беларуси с использованием модели WRF / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. – 2021. – № 4. – С. 50–68.
10. Лысенко, С. А. Геоинформационная система повышения оправдываемости гидродинамического прогноза погоды для территории Беларуси на основе данных дистанционного зондирования Земли и объективного анализа метеорологических полей / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // *Природопользование*. – 2024. – № 1. – С. 30–40.
11. Kipf, T. N. Semi-Supervised Classification with Graph Convolutional Networks / T. N. Kipf, M. Welling // *ArXiv preprint*. – 2016. – arXiv:1609.02907.
12. T-GCN: A Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Prediction / L. Zhao [et al.] // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2020. – Vol. 21, № 9. – P. 3848–3858.
13. A3T-GCN: Attention Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Forecasting / Bai J. [et al.] // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2021. – Vol. 10, № 7. – P. 485.

References

1. Harvey A. C. Time Series Models. 2nd edition. New York, Harvester Wheatsheaf Publ., 1993, pp. 179–198.
2. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, pp. 35–45.
3. Alerskans E., Kaas E. Local temperature forecasts based on statistical post-processing of numerical weather prediction data. *Meteorol. Appl.*, 2021, vol. 28, no. 4, 21 p.
4. Bykov F. L. *Statisticheskaya korrekciya prognozov pogody po modeli COSMO s pomoshch'yu nejronnyh setej* [Statistical correction of weather forecasts based on the COSMO model using neural networks] *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 3, pp. 5–20. (in Russian)
5. Vannitsem S., Bremnes J. B., Demaeyer J., Evans G., e.a. Statistical Postprocessing for Weather Forecasts: Review, Challenges, and Avenues in a Big Data World. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, vol. 102, no. 3, pp. E681–E699.
6. Bengtsson L., Ghil M., Kallen E. Dynamic Meteorology: Data Assimilation Methods. New York, Springer-Verlag Publ., 1981, 330 p.
7. Lorenc A. C. Analysis methods for numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1986, vol. 112, pp. 1177–1194.
8. Rozinkina I. A., Rivin G. S., Burak R. N., e.a. *Formirovanie produkciy sistem negidrostaticheskogo modelirovaniya atmosfery COSMO-RuBy (Gidrometcentr Rossii) i WRF-ARW (Belgidromet) dlya kratkosrochnogo prognoza pogody* [Product development of COSMO-RuBy (Hydrometeorological Center of Russia) and WRF-ARW (Belhydromet) non-hydrostatic atmospheric modeling systems for short-term weather forecast]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological studies and forecasts*, 2021, vol. 4 (382), pp. 6–29. (in Russian)

9. Lysenko S. A., Zaiko P. O. *Ocenki vliyaniya podstilayushchej poverhnosti na tochnost' chislennogo prognoza temperatury vozduha na territorii Belarusi s ispol'zovaniem modeli WRF* [Estimation of the influence of the underlying surface on the accuracy of the numerical forecast of air temperature in Belarus using the WRF model]. *Gidro meteorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological studies and forecasts*, 2021, vol. 4, pp. 50–68. (in Russian)
10. Lysenko S. A., Zaiko P. O. *Geoinformacionnaya sistema povysheniya opravdyvaemosti gidrodinamicheskogo prognoza pogody dlya territorii Belarusi na osnove dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli i ob'ektivnogo analiza meteorologicheskikh polej* [Geoinformation system for improving the accuracy of hydrodynamic weather forecasting for the territory of Belarus based on remote sensing data and objective analysis of meteorological fields]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 30–40. (in Russian)
11. Kipf T. N., Welling M. Semi-Supervised Classification with Graph Convolutional Networks. *ArXiv preprint*, 2016, arXiv:1609.02907.
12. Zhao L., Song Y., Zhang C., et al. T-GCN: A Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol. 21, no. 9, pp. 3848–3858.
13. Bai J., Zhu J., Song Y., et al. A3T-GCN: Attention Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Forecasting. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, vol. 10, no. 7, p. 485.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

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

УДК 631.434:631.459(476)

Поступила в редакцию 27.11.2025
Received 27.11.2025

ОЦЕНКА ПРОЯВЛЕНИЯ ЗАСУХ НА ПОЧВАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ И ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

С. А. Лысенко, И. В. Буяков, В. И. Мельник

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье исследуются возможности определения влажности почвы на территории Белорусского Поозерья на основе микроволнового и мультиспектрального оптического зондирования Земли. Предлагается способ определения влажности почвы, основанный на дополнении результатов микроволнового зондирования Земли оценками суточных вариаций температуры подстилающей поверхности, измеряемой спутниковыми радиометрами в окне прозрачности атмосферы 10–12 мкм, и получении калибровочного уравнения на основе реанализа ERA5-Land. Предложенный способ реализован для Белорусского Поозерья на базе платформы облачных вычислений Google Earth Engine. Показано, что сопоставление текущих оценок влажности почвы, вегетационного индекса и температуры подстилающей поверхности с их минимальными и максимальными значениями для заданного времени года позволяет оценивать интенсивность засухи, ее пространственное распределение и влияние на состояние посевов. Проанализированы многолетние изменения индекса здоровья растений (VHI), рассчитываемого по нормированным значениям вегетационного индекса NDVI и температуры подстилающей поверхности, для различных месяцев вегетационного периода. Показано, что более раннее наступление вегетационного периода улучшает состояние сельскохозяйственных растений в мае, однако в последующие месяцы условия вегетации ухудшаются. В июне на всей территории Витебской области, а в июле и августе в восточной части области возрастают риски температурного и водного стресса у растений, связанные с более частым образованием мощных блокирующих антициклонов. Выявленные в работе геопространственные особенности влияния изменений климата на состояние сельскохозяйственных растений необходимо учитывать для более эффективного использования нового агроклиматического потенциала Белорусского Поозерья.

Ключевые слова: изменение климата; засухи; влажность почвы; дистанционное зондирование; индекс здоровья растений.

Для цитирования. Лысенко С. А., Буяков И. В., Мельник В. И. Оценка проявления засух на почвах сельскохозяйственных земель Белорусского Поозерья с использованием температурно-влажностных и вегетационных индексов по данным дистанционного зондирования Земли // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 19–35.

ASSESSMENT OF DROUGHT MANIFESTATION ON SOILS OF AGRICULTURAL LANDS OF THE BELARUSIAN LAKELAND USING TEMPERATURE-MOISTURE AND VEGETATION INDICES BASED ON REMOTE SENSING DATA

S. A. Lysenko, I. V. Buyakov, V. I. Melnik

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

Abstract. The article studies the possibilities of determining soil moisture in the territory of the Belarusian Lakeland on the basis of microwave and multispectral optical Earth sensing. The method of soil moisture determination is proposed, based on supplementing the results of microwave Earth sensing with estimates of daily variations of the land surface temperature measured by satellite radiometers in the atmospheric transparency window of 10–12 μm , and obtaining the calibration equation based on the ERA5-Land reanalysis. The proposed method has been implemented for the Belarusian Lakeland on the basis of the Google Earth Engine cloud computing platform. It is shown that comparison of current estimates of soil moisture, vegetation index and land surface temperature with their minimum and maximum values for a given time of the year allows

estimating the intensity of drought, its spatial distribution and impact on the state of crops. Multiyear changes in the vegetation health index (VHI), calculated from normalised values of vegetation index NDVI and land surface temperature, were analysed for different months of the growing season. It is shown that earlier onset of the growing season improves the condition of agricultural plants in May, but in the following months the vegetation conditions deteriorate. In June in the whole territory of Vitebsk region, and in July and August in the western part of the region, the risks of temperature and water stress in plants increase due to more frequent formation of powerful blocking anticyclones. The geospatial peculiarities of climate change impact on agricultural plants revealed in this paper should be taken into account for more effective use of the new agroclimatic potential of the Belarusian Lakeland.

Keywords: climate change; droughts; soil moisture; remote sensing; vegetation health index.

For citation. Lysenko S. A., Buyakov I. V., Melnik V. I. Assessment of drought manifestation on soils of agricultural lands of the Belarusian Lakeland using temperature-moisture and vegetation indices based on remote sensing data // *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 19–35.

Введение. Наблюдаемые в последние десятилетия быстрые изменения агроклиматических условий в Беларуси существенным образом сказываются на продуктивности местных растительных сообществ и урожайности сельскохозяйственных культур. С одной стороны, увеличение продолжительности вегетационного периода и суммы активных температур открывает для сельского хозяйства Беларуси новые перспективы (в частности, становится возможным выращивание более теплолюбивых и доходных культур, которые раньше не вызревали в белорусском климате). С другой стороны, возрастает риск атмосферных засух и периодов экстремально высоких температур. Кроме того, более теплый и длинный вегетационный период может способствовать распространению новых видов вредителей и болезней.

В последние годы в научной литературе большое внимание уделялось изучению влияния изменений климата на продуктивность экосистем Белорусского Полесья, где формируется зона рискованного земледелия с устойчивым дефицитом водных ресурсов [1–4]. Однако при нынешних темпах потепления те агроклиматические условия, которые в современный период характеризуют юг Беларуси, уже через 30 лет будут относиться к северу страны [5]. Согласно расчетам климатических моделей CMIP6, тенденции изменения климата как на севере, так и на юге страны примерно одинаковы: рост среднегодовой температуры к 2050 г. на 2,8–3,8 °C относительно базового периода 1961–1990 гг. при практически неизменной годовой сумме атмосферных осадков [6]. Уже сейчас на севере страны (в Витебской области) суммарное испарение в теплый период года (май – сентябрь) превышает осадки на 10–30 мм, и в дальнейшем дефицит влаги будет только нарастать [3, 6]. В этой связи, чтобы максимально реализовать новый потенциал, сельскому хозяйству Беларуси потребуются адаптация к изменяющимся климатическим условиям с целью оптимизации водного режима и сохранения влаги в почве. Важным элементом будущей интегрированной системы адаптации к изменению климата станет система мониторинга и раннего предупреждения различных стадий засухи на основе комбинированной спутниковой и наземной информации.

Данные дистанционного зондирования Земли широко применяются для оценок влияния засух на растительные сообщества, поскольку предоставляют подробную картографическую информацию о состоянии посевных площадей и биопродуктивности в масштабах всей страны за длительный период. В качестве количественной меры состояния растительного покрова используются различные индексы, характеризующие поглощение растительностью фотосинтетически активной радиации, содержание хлорофилла и воды в почвенно-растительном покрове, тепловой стресс растений и т. п. [7]. Наиболее известными являются индексы, рассчитываемые по спектрам отражения земной поверхности в видимом и ближнем ИК-диапазонах – вегетационные индексы NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и EVI (Enhanced Vegetation Index), характеризующие общее состояние зеленой растительности; влажностный индекс NDWI (Normalized Difference Water Index), характеризующий содержание воды в растениях. Помимо этого, для оценки температурного и водного стресса у растений часто используются значения температуры подстилающей поверхности LST (Land Surface Temperature), измеряемой в тепловом ИК-диапазоне [8, 9]. Совместное использование вегетационных индексов и LST позволяет более достоверно оценивать различные аспекты засухи. Примером тому являются индексы сухости растительности TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) и здоровья растений VHI (Vegetation Health Index), определяемые в пространстве индексов NDVI-LST [8, 10–15].

Стоит отметить, что методы оптического дистанционного зондирования (в видимом и инфракрасном диапазонах) позволяют лишь косвенно оценить влажность почвы. Прямое измерение влажности почвы из космоса возможно только методами микроволнового (радиолокационного) зондирования. Существующие спутниковые приборы, основанные на этом принципе, в зависимости от используемого в них источника

излучения разделяются на *активные радиолокаторы* (например, SAR – Synthetic Aperture Radar), посылающие радиоимпульс и принимающие отраженный от поверхности сигнал, и *пассивные радиометры* (например, SMAP – Soil Moisture Active Passive и SMOS – Soil Moisture and Ocean Salinity), измеряющие собственное микроволновое излучение Земли. Главной проблемой на пути использования этих данных в мониторинге почвенных засух является подверженность результатов измерений множеству помех, включая влияние растительности и шероховатости поверхности, типа почвы, ее засоленности и температуры, что требует использования сложных моделей для точной калибровки [12, 13].

В последние годы активно развиваются методы, основанные на слиянии данных оптического и микроволнового зондирования в алгоритмах машинного обучения. Использование многоспектральных оптических снимков в сочетании с радиолокационными данными позволяет повысить пространственное разрешение карт влажности и более эффективно компенсировать помехи от растительности [14–17].

Цель работы – проанализировать возможности использования данных спутникового микроволнового радиометра SMAP (NASA) и мультиспектральных оптических сенсоров для мониторинга состояния посевов и почвенных засух на территории Белорусского Поозерья. На основе анализа тренда индекса здоровья растений (VHI), отражающего температурно-влажностный стресс у растений, проанализированы изменения условий вегетации за период 2000–2024 гг.

Исходные данные и методы исследования. В ходе настоящего исследования разработана экспериментальная версия геоинформационной системы для картографирования и мониторинга состояния посевов и почвенных засух на территории Витебской области, занимающей большую часть Белорусского Поозерья, на основе данных дистанционного зондирования Земли и облачных вычислений.

Доступ к материалам спутниковой съемки и продуктам на ее основе осуществляется посредством облачной платформы Google Earth Engine (GEE), объединяющей обширный мультитременной каталог геопространственных данных и программные средства их обработки и анализа. Доступ и работа с данными на платформе GEE осуществляются через программный интерфейс пользователя на JavaScript или Python. Пользователи могут запрашивать и анализировать данные из общедоступного каталога или же загружать свои собственные данные. Все вычисления на платформе GEE производятся на серверах Google, что освобождает пользователя от необходимости задействовать свои вычислительные мощности и многократно сокращает время и затраты на обработку данных.

Разработанная информационная система основана на использовании данных радиометра среднего спектрального разрешения видимого и ближнего ИК-диапазонов MODIS на спутниковых платформах Terra и Aqua (NASA), спутникового микроволнового радиометра SMAP (NASA). Для выделения пахотных земель на спутниковых изображениях используется классификация почвенно-растительного покрова Global Land Cover 2019 (GLC2019) на основе результатов обработки данных спутникового сканера высокого спектрального разрешения PROBA-V Европейского Космического Агентства. Набор данных GLC2019 содержит 23 класса землепользования с пространственным разрешением 100 м и в достаточно полной мере отражает современную пространственную структуру ландшафтов Беларуси.

Для оценки состояния посевов используются результаты обработки данных MODIS – нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) и температура подстилающей поверхности (LST) для дневного и ночного времени суток, представленные на платформе GEE в виде информационных продуктов MOD13Q1.061 (16-дневные композиты NDVI с пространственным разрешением 250 м) и MOD11A2.061 (8-дневные композиты LST с разрешением 1 км). Каталог данных GEE также включает информационный продукт MOD09Q1.061, содержащий коэффициенты яркости подстилающей поверхности в каналах радиометра MODIS из красной (620–670 nm) и ближней ИК (841–876 nm) областей спектра (скорректированные на влияние атмосферы и прошедшие контроль качества), что позволяет рассчитывать NDVI с временным разрешением 8 суток и пространственным разрешением 250 м.

Выбор спектральных каналов для вычисления NDVI основан на свойстве зеленой растительности поглощать солнечное излучение в красном участке спектра и эффективно отражать его в ближнем ИК-диапазоне. Для зеленой растительности NDVI всегда принимает положительные значения и растет с увеличением фитомассы. При этом для оценки состояния растительности важным является не столько абсолютное значение NDVI, сколько его относительное положение на шкале от минимального до максимального за весь период наблюдений. Такую информацию предоставляет индекс состояния растительности VCI (Vegetation Condition Index), который сравнивает текущее значение NDVI с диапазоном его значений, наблюдавшихся в тот же период за предыдущие годы. VCI варьирует от 0 для крайне неблагоприятных условий до 1 для оптимальных условий. Для его вычисления используется следующая формула [8, 18]:

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}, \quad (1)$$

где $NDVI_{\max}$ и $NDVI_{\min}$ – соответственно многолетние минимум и максимум NDVI для заданного пикселя на заданную дату (± 15 дней, учитывая разные даты начала вегетации для разных лет).

Температура подстилающей поверхности (LST) является результатом обработки измерений яркостной температуры на верхней границе атмосферы в двух спектральных каналах спутникового прибора MODIS из окна прозрачности атмосферы (10–12 мкм). Информационный продукт MOD11A2.061, представленный на платформе GEE, включает 8-дневные композитные карты дневной и ночной LST с пространственным разрешением 1 км. На его основе рассчитывается индекс температурных условий TCI (Temperature Condition Index), который используется для определения теплового стресса у растений. Текущие температурные условия оцениваются относительно максимальной и минимальной температур, которые наблюдались на заданную дату за прошлые годы. Для вычисления TCI используется следующая формула [9, 19]:

$$TCI = \frac{LST_{\max} - LST}{LST_{\max} - LST_{\min}}, \quad (2)$$

где $LST_{\min}$ и $LST_{\max}$ – соответственно максимальное и минимальное значение дневной температуры подстилающей поверхности за все годы ее измерений на заданную дату (± 15 дней, учитывая разную дату начала вегетации). Индекс TCI изменяется в диапазоне 0–1, где значение 0 означает крайне высокий риск температурного стресса растений.

Для спутникового мониторинга сельскохозяйственных засух часто используется индекс здоровья растений VHI (Vegetation Health Index), представляющий собой линейную комбинацию двух рассмотренных ранее индексов – VCI и TCI [20]:

$$VHI = \alpha VCI + (1 - \alpha) TCI, \quad (3)$$

где весовой коэффициент α задает вклады аномалий NDVI и LST в значение VHI и изменяется в зависимости от региона и климатических условий [21]. На практике значение весового коэффициента α чаще всего выбирается равным 0,5, что означает одинаковый вклад аномалии NDVI и температурного стресса растений в индекс VHI.

VHI изменяется от 0, что соответствует высокой степени засухи, до 1, что соответствует влажным или незасушливым условиям. Согласно существующей классификации VHI, значения $VHI \geq 0,50$ свидетельствуют об отсутствии засухи в районе, $VHI = 0,35-0,50$ – о слабой засухе, $VHI = 0,20-0,35$ – об умеренной засухе, $VHI = 0,10-0,20$ – о сильной засухе и $VHI \leq 0,10$ – об экстремальной засухе.

Для мониторинга почвенных засух важное значение также имеет аномалия влажности почвы. Современные оптические системы дистанционного зондирования Земли позволяют получать оценки влажности почвы по измерениям собственного теплового излучения Земли в микроволновом (СВЧ) диапазоне спектра. Микроволновое излучение с $\lambda > 1-2$ см практически не рассеивается безоблачной атмосферой и не поглощается атмосферными газами, а длины волн свыше 3–5 см способны беспрепятственно проходить через облака и туманы, что делает микроволновые измерения практически всепогодными.

Спутниковый микроволновой радиометр регистрирует уходящее излучение на верхней границе атмосферы, интегральной характеристикой которого является радиояркостная температура T_b . В СВЧ-диапазоне она пропорциональна произведению их термодинамической температуры и излучательной способности [22]. Термодинамическая температура земной поверхности (LST) определяется по результатам независимых измерений уходящего теплового излучения в окне прозрачности атмосферы в ИК-области спектра (10–12 мкм). При известной температуре подстилающей поверхности измерения радиояркостной температуры на верхней границе атмосферы позволяют оценить излучательную способность подстилающей поверхности и по ней вычислить влажность поверхностного слоя почвы. Увеличение влажности почвы приводит к уменьшению излучательной способности почвы, что отчетливо проявляется в значении радиояркостной температуры.

Это принцип определения влажности почвы по данным пассивного микроволнового зондирования из космоса реализован в спутниковом приборе NASA SMAP (Soil Moisture Active Passive), выведенном на околоземную орбиту в январе 2015 г. Данный прибор регистрирует уходящее микроволновое излучение

в L-диапазоне ($\nu = 1\text{--}2$ ГГц, $\lambda = 15\text{--}30$ см) в горизонтальной и вертикальной поляризациях. Поляризационные измерения радиояростной температуры выполняются с целью оценки оптической толщины растительного полога, влияющей на результат определения влажности почвы [23].

С целью валидации результатов дистанционных измерений влажности почвы спутниковым прибором SMAP проведено их сопоставление с данным реанализа ERA5-Land для территории Витебской области за период май – сентябрь 2015–2024 гг.

Посредством программного интерфейса GEE на Python случайным образом выбрано 50 точек, попадающих на пахотные земли Витебской области. Разновременные значения влажности почвы, полученные для выбранных точек за период май – сентябрь 2015–2024 гг. по данным SMAP и реанализа ERA5 сопоставлены на рис. 1. Цветом на нем показана плотность точек. Связь значений влажности почвы из двух рассматриваемых архивов данных описывается уравнением $ERA5 = 0,605 \text{ SMAP} + 0,198$ с коэффициентом корреляции $R = 0,60$.

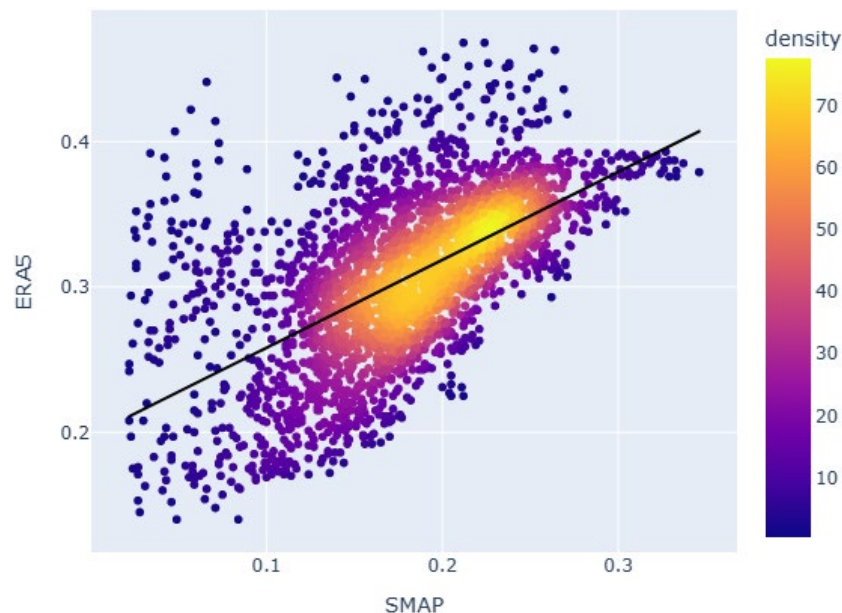


Рис. 1. Оценки влажности почвы, полученные для пахотных земель Витебской области спутниковым прибором SMAP в сравнении с данными реанализа ERA5 за период май – сентябрь 2015–2024 гг.

Fig. 1. Soil moisture estimates obtained for the croplands of the Vitebsk region by the SMAP satellite instrument in comparison with the ERA5 reanalysis data for May – September 2015–2024

Еще одним важным индикатором влажности почвы, предложенным авторами данной работы, является нормированная разница LST для дневного и ночного времени суток, характеризующая амплитуду суточных колебаний LST. Более влажные почвы из-за высокой удельной теплоемкости воды, как правило, являются более инерционными в плане температурных колебаний. Такие почвы меньше подвержены риску перегрева днем и медленнее выхолаживаются ночью. В этой связи разницу LST для дневного и ночного времени суток, приведенную к диапазону 0–1 с учетом ее минимального и максимального значений для заданного времени года, можно рассматривать в качестве индикатора тепловой инерции почвы, зависящей от ее увлажненности.

Для вычисления введенного нами индекса амплитуды суточных колебаний температуры подстилающей поверхности DTVI (Daily Temperature Variation Index) предложена следующая формула:

$$DTVI = \frac{\Delta LST_{\max} - \Delta LST}{\Delta LST_{\max} - \Delta LST_{\min}}, \quad (4)$$

где ΔLST – разница между дневной и ночной LST, определяемая по данным MODIS; $\Delta LST_{\max}$ и $\Delta LST_{\min}$ – соответственно максимум и минимум ΔLST для заданного пикселя на заданную дату (± 15 дней) за весь период спутниковых измерений LST. Значение DTVI изменяется в диапазоне 0–1: со значением 0, означающим экстремально низкую тепловую инерцию почвы (высокую подверженность колебанию температуры на протяжении суток), и значением 1, означающим максимально высокую тепловую инерцию почвы с хорошей увлажненностью.

Индекс DTVI позволяет значительно уточнить оценку влажности почвы прибором SMAP. Простое уравнение линейной регрессии, включающее в качестве предикторов аномалию влажности почвы по данным SMAP (по сравнению с ее средним значением на заданную дату, начиная с 2015 г.) и индекс DTVI, позволяет повысить коэффициент корреляции оценок влажности почвы с данными ERA5 до 0,69. Еще более точных оценок влажности почвы можно достичь при включении в отмеченное уравнение регрессии сомножителей, учитывающих географическую зональность по долготе. Коэффициенты данного уравнения получены на основе близких по времени оценок влажности почвы прибором SMAP, дневной и ночной температур земной поверхности прибором MODIS и данных реанализа ERA5 за период май – сентябрь 2015–2024 гг. Синхронизация спутниковых информационных продуктов SMAP, MODIS и сеточных данных ERA5 выполнена на платформе GEE посредством программного интерфейса на Python. В качестве статистической выборки взяты те же 50 точек на пахотных землях Витебской области, что и для получения парной корреляции, показанной на рис. 1. С учетом статистического анализа полученных данных предлагается следующее уравнение для определения влажности почвы (SM) на пахотных землях Белорусского Поозерья по данным спутниковых приборов MODIS и SMAP:

$$SM = 1,540 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\theta}{360} + 1,334 \right) \right] SMAP + 15,08 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\theta}{360} - 3,496 \right) \right] DTVI, \quad (5)$$

где θ – долгота в градусах; SMAP – аномалия влажности почвы по данным прибора SMAP.

Расчеты влажности почвы по уравнению (5) сопоставлены с данными реанализа ERA5 на рис. 2. Коэффициент корреляции между сопоставляемыми значениями составляет 0,71, что свидетельствует о возможности вполне приемлемых для практических целей оценок влажности почвы по данным дистанционного зондирования Земли спутниковыми приборами SMAP и MODIS.

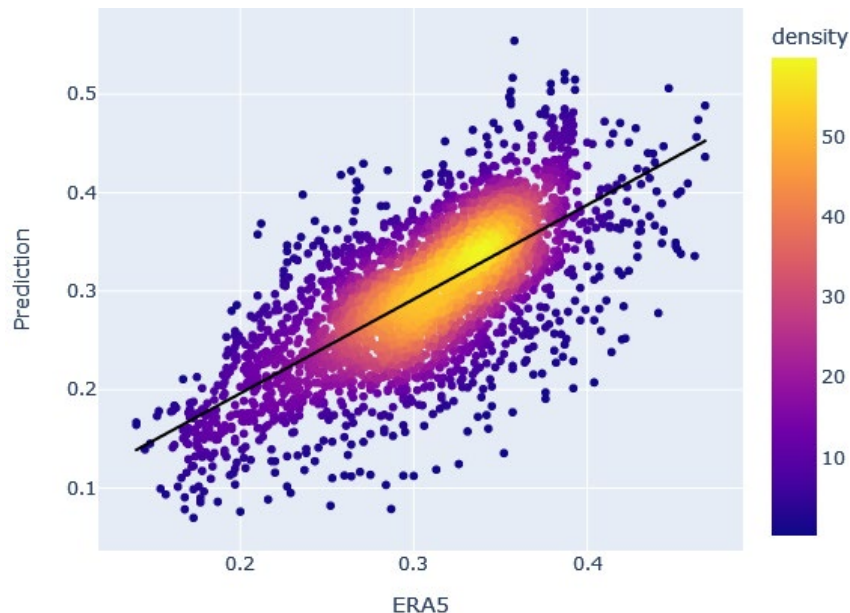


Рис. 2. Сопоставление результатов расчета влажности почвы по уравнению регрессии (5) с данными реанализа ERA5

Fig. 2. Comparison of soil moisture calculation results using regression equation (5) with ERA5 reanalysis data

Важно отметить, что поскольку температура подстилающей поверхности измеряется прибором MODIS с пространственным разрешением 1 км, то и итоговая влажность почвы, рассчитываемая по уравнению (5), также будет иметь разрешение ~1 км, что значительно выше, чем у прибора SMAP (~9 км). Таким образом, измерения дневной и ночной LST позволяют не только улучшить точность определения влажности почвы, но и почти на порядок повысить пространственное разрешение. Присутствие в уравнении регрессии (5) сомножителей, зависящих от долготы, позволяет скорректировать весовые вклады SMAI и DTVI с учетом географической зональности и континентальности климата.

В разработанной системе спутникового мониторинга засух использованы данные двух спутниковых приборов NASA (MODIS и SMAP) и маска пахотных земель из глобальной классификации подстилающей поверхности GLC2019. На основе этих данных рассчитаны и отображены на интерактивных картах индексы состояния растительности (VCI) с разрешением 250 м, температурных условий (TCI) с разрешением 1 км, здоровья растительности (VHI) с разрешением 250 м, суточных вариаций температуры подстилающей поверхности (DTVI) с разрешением 1 км, влажность слоя почвы 0–5 см по данным SMAP с разрешением 9 км и влажность слоя почвы 0–5 см по совместным данным SMAP и MODIS с разрешением 1 км, которая также нормируется в виде индекса SMAI (Soil Moisture Anomaly Index) к диапазону 0–1.

Разработанная система позволяет анализировать как последние актуальные данные дистанционного зондирования Земли с целью оценки текущих условий вегетации, так и исторические архивы спутниковой информации с целью анализа трендов и изменений вегетационных и температурно-влажностных индексов пахотных земель для разных месяцев вегетационного периода.

Анализ вышеуказанных спутниковых индексов наряду с наземной метеорологической информацией предоставляет комплексную информацию о всех стадиях наступления и развития засухи – атмосферной, почвенной, сельскохозяйственной. Для выявления атмосферной засухи можно использовать стандартные индексы дефицита осадков, такие как стандартизированный индекс осадков (SPI – Standardized Precipitation Index). Индексы аномалии влажности почвы (SMAI), тепловых условий (TCI) и суточных вариаций температуры подстилающей поверхности (DTVI) помогают оценить масштаб и интенсивность почвенной засухи. Индексы состояния (VCI) и здоровья (VHI) растительности позволяют судить о водном стрессе сельскохозяйственных культур, вызванном дефицитом почвенной влаги, оценивать процент пахотных земель, охваченных засухой разной степени интенсивности и прогнозировать ее влияние на состояние посевов.

Анализ трендов вегетационных и температурно-влажностных индексов пахотных земель на разных уровнях статистической значимости позволяет выявить наиболее уязвимые к изменению климата территории, требующие первоочередного внимания в части адаптации к новым агроклиматическим условиям. Для обнаружения трендов во временных рядах вегетационных и температурно-влажностных индексов используется непараметрический тест Манна – Кендалла. Данный тест позволяет принимать или отвергать (при заданном уровне значимости α) нулевую гипотезу H_0 об отсутствии тренда во временном ряду на основании статистик (S и Z), рассчитываемых по разностям между увеличивающимися или уменьшающимися парами значений в исследуемом временном ряду.

S -статистика вычисляется следующим образом:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k), \quad (6)$$

где n – длина временного ряда; X_k и X_j – значения во временном ряду, соответствующие меткам времени k и $j > k$:

$$\text{sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} -1, & \text{при } X_j < X_k \\ 0, & \text{при } X_j = X_k \\ 1, & \text{при } X_j > X_k \end{cases}. \quad (7)$$

Положительное значение S указывает на возрастание значений во временном ряду, а отрицательные – на их убывание. При $n \geq 9$ распределение S примерно подчиняется нормальному распределению со средним нулевым значением и стандартным отклонением:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right], \quad (8)$$

где g – количество подмножеств временного ряда, состоящих из одинаковых элементов; t_p – количество элементов в подмножестве p .

Стандартизация S -статистики дает Z -статистику с нулевым средним и единичным стандартным отклонением:

$$Z = \begin{cases} (S+1)/\sqrt{\text{VAR}(S)}, & \text{при } S < 0 \\ 0, & \text{при } S = 0 \\ (S-1)/\sqrt{\text{VAR}(S)}, & \text{при } S > 0 \end{cases}. \quad (9)$$

Полученное значение Z сравнивается с теоретическим распределением, полученным Манном и Кендаллом. Нулевая гипотеза (об отсутствии тренда) отвергается в том случае, когда найденное значение Z превышает теоретические пороги $Z_{1-\alpha/2}$ (при двусторонней альтернативе) или $Z_{1-\alpha}$ (при односторонней альтернативе), соответствующий уровню статистической значимости α .

Для вычисления коэффициента линейного тренда используется непараметрический метод Тейла – Сена, который для множества точек на плоскости (t_i, z_i) определяет наклон тренда как медиану m коэффициентов $(z_j - z_i) / (t_j - t_i)$ по всем парам точек выборки (временного ряда). Данный метод менее чувствителен к выбросам и аномалиям в данных и лучше подходит для несимметричных и гетероскедастичных данных, чем стандартный метод наименьших квадратов.

Апробация спутниковых индексов для территории Белорусского Поозерья. Рассмотрим примеры использования вышеописанных спутниковых индексов для оценок влажности почвы и состояния посевов в нормальных и засушливых условиях.

Для сравнения взято два периода – 01.06.2022–15.06.2022 и 01.06.2023–15.06.2023, существенно отличающихся по сумме атмосферных осадков, выпавших на территории Витебской области. В июне 2022 г. на ее территории выпало 89,2 мм атмосферных осадков, или 117 % от нормы, а в июне 2023 г. – 29,5 мм, или 39 % от нормы. Июнь 2023 г. по количеству атмосферных осадков в Витебской области занял второе место в ранжированном ряду наблюдений от самого засушливого к самому влажному, начиная с 1945 г.

На рис. 3 приведены карты влажности почвы по данным спутникового микроволнового радиометра SMAP, индекса суточных вариаций температуры подстилающей поверхности (DTVl) и индекса аномалии влажности почвы (SMAI – Soil Moisture Anomaly Index), рассчитанного по объединенным данным спутниковых приборов SMAP и MODIS для июня 2022 г. Из рис. 3, а видно, что объемное содержание воды в слое почвы 0–5 см в указанный период было не ниже 20 %, а на севере области доходило до 30–35 %. Индекс DTVl на пахотных землях области был значительно выше среднего значения, а в отдельных районах достигал максимальных значений (см. рис. 3, б). Высокие значения индекса DTVl означают высокую тепловую инерцию почвы (малую амплитуду суточных колебаний LST), связанную с ее хорошим увлажнением.

Оценки влажности почвы и индекса DTVl позволяют по формуле (5) рассчитать индекс аномалии влажности почвы SMAI с разрешением ~1 км. Карта распределения этого индекса по пахотным землям Витебской области представлена на рис. 3, в. Высокая положительная аномалия SMAI говорит о достаточно хорошей увлажненности почвы на всей территории области.

Аналогичные карты SMAP, DTVl и SMAI, но для засушливого периода 2023 г., представлены на рис. 4. Видно, что здесь ситуация полностью противоположна той, что отмечалась для июня 2022 г. Влажность почвы по данным прибора SMAP (см. рис. 4, а) на большей части области меньше 10–15 %, а на юго-востоке области – меньше 5 %, что говорит о высоком дефиците почвенной влаги.

Низкие значения индекса DTVl (см. рис. 4, б) указывают на малую теплоемкость почвы, связанную с малым объемным содержанием в ней воды. При этом согласно распределению индекса DTVl наиболее критичной ситуация с засухой обострялась на западе области, что также подтверждается расчетами индекса аномалии влажности почвы, показанного на рис. 4, в. Значения SMAI < 0,1, наблюдаемые в западной части области, указывают на чрезвычайно сильный дефицит почвенной влаги, вызванный длительной атмосферной засухой.

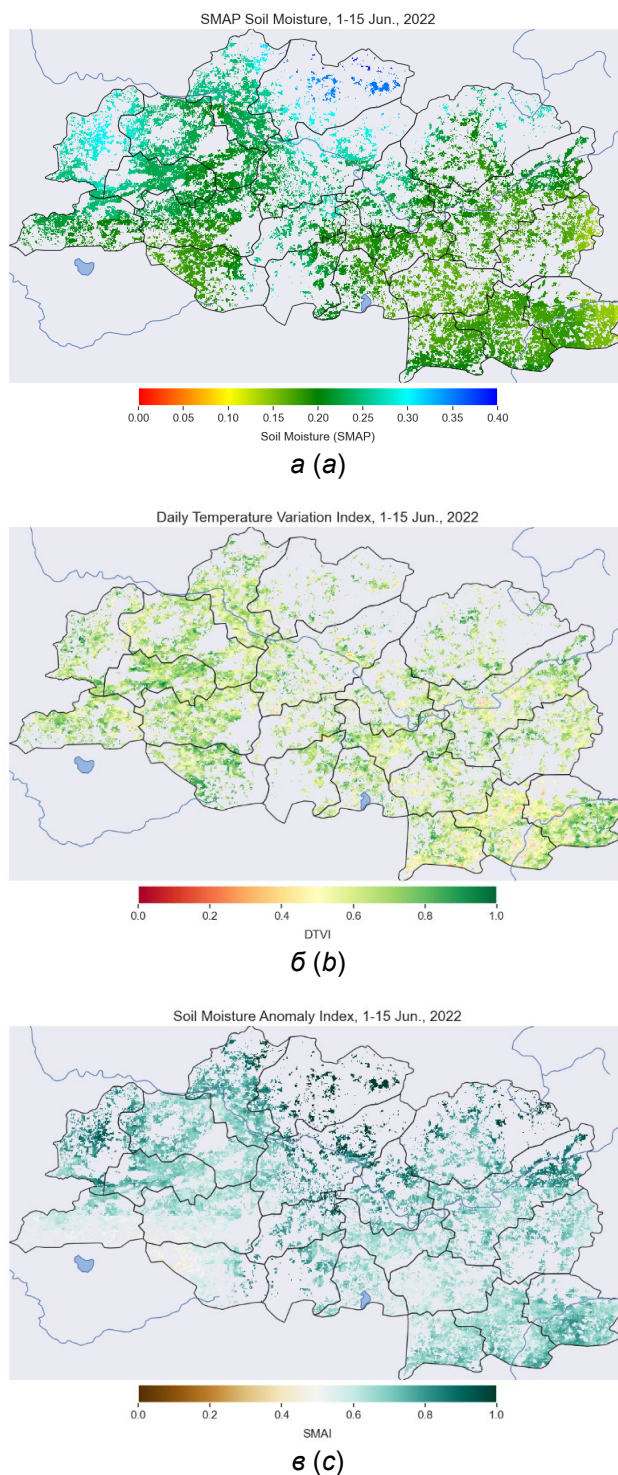


Рис. 3. Карты распределений влажности почвы по данным SMAP (а), индекса суточных вариаций LST по данным MODIS (б) и аномалии влажности почвы по объединенным данным SMAP и MODIS (в) за период за период 1–15 июня 2022 г.

Fig. 3. Maps of soil moisture distributions from SMAP data (a), daily temperature variation index from MODIS data (b), and soil moisture anomaly from combined SMAP and MODIS data (c) for the period June 1–15, 2022

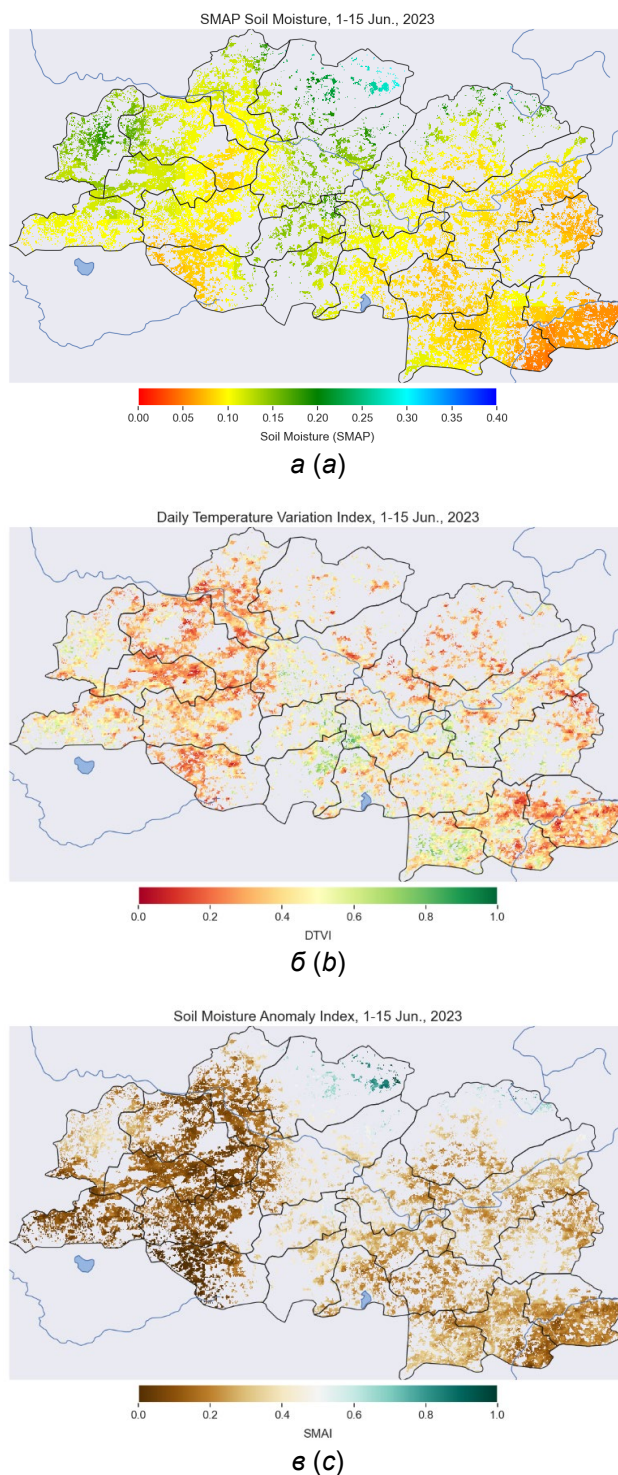


Рис. 4. Карты распределений влажности почвы по данным SMAP (а), индекса суточных вариаций LST по данным MODIS (б) и аномалии влажности почвы по объединенным данным SMAP и MODIS (в) за период 1–15 июня 2023 г.

Fig. 4. Maps of soil moisture distributions from SMAP data (a), daily temperature variation index from MODIS data (b), and soil moisture anomaly from combined SMAP and MODIS data (c) for the period June 1–15, 2023

О влиянии почвенной засухи на состояние посевов можно судить по картам распределения индекса здоровья растений (VHI), представленным на рис. 5. В период с нормальным увлажнением почвы (июнь 2022 г.) значения VHI для большинства сельскохозяйственных полей выше его среднего значения за предыдущие годы (за исключением отдельных полей, на которых отрицательные аномалии VHI могут быть связаны со сменой выращиваемых культур в рассматриваемый год).

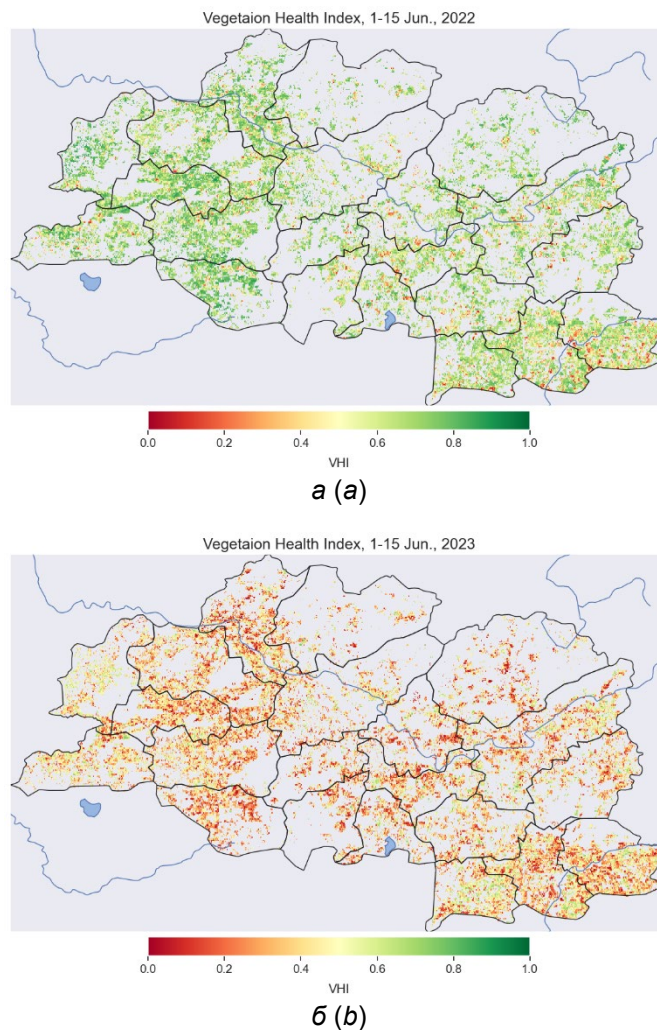


Рис. 5. Карты распределений индекса здоровья растений (VHI) на территории Витебской области для нормального (а) и засушливого (б) периодов

Fig. 5. Maps of the Vegetation Health Index (VHI) in the Vitebsk region for normal (a) and dry (b) periods

Из рис. 5, б видно, что в условиях почвенной засухи значения VHI находятся в левой части шкалы его значений. Достаточно сильная засуха в июне 2023 г. заметно повлияла на состояние посевов: VHI опустился до минимальных значений, что говорит о мощном стрессе растений, вызванном высокими температурами и дефицитом почвенной влаги.

Таким образом, на основании анализа карт спутниковых индексов SMAP, DTVI, SMAI и VHI можно с высокой степенью объективности выявлять и отслеживать все стадии наступления засухи и ее влияние на состояние посевов и тем самым прогнозировать возможные потери урожая и ущерб, связанный с опасными погодными явлениями. Важной возможностью данного метода является объективная оценка процента пахотных земель области, подверженных почвенной или сельскохозяйственной засухам различной интенсивности.

Анализ долгосрочных изменений индекса здоровья растений на землях Белорусского Поозерья. Для понимания долгосрочных изменений условий вегетации на территории Белорусского Поозерья рассмотрим тренды индекса здоровья растений для пахотных земель Витебской области. Тренды VHI рассчитывали для каждого месяца с мая по сентябрь, основываясь на данных спутникового прибора MODIS за 2000–2024 гг. Статистическую значимость трендов оценивали согласно тесту Манна – Кендалла на уровне $\alpha = 0,05$. Коэффициент наклона линейного тренда оценивали по методу Тейла – Сена. Карты коэффициента линейного тренда VHI приведены для разных месяцев вегетационного периода на рис. 6 и 7.

В мае в Витебской области статистически значимое повышение VHI отмечается для 17,5 % пахотных земель, а статистически значимое понижение VHI – для 8,2 % земель (см. рис. 6, а), что говорит об улучшении агроклиматических условий в мае за счет более раннего начала вегетации и большей теплообеспеченности территории области.

Ситуация с изменением агроклиматических условий для июня обстоит совершенно иначе (см. рис. 6, б). Статистически достоверный рост среднего для июня индекса VHI отмечается лишь на 4 % пахотных земель, а статистически достоверное понижение VHI – для 21 % пахотных земель. Таким образом, рост температуры воздуха и усиление засушливости климата в июне уже, очевидно, начали оказывать негативное влияние на состояние сельскохозяйственных культур и далее отмеченные тенденции с большой вероятностью будут только усиливаться.

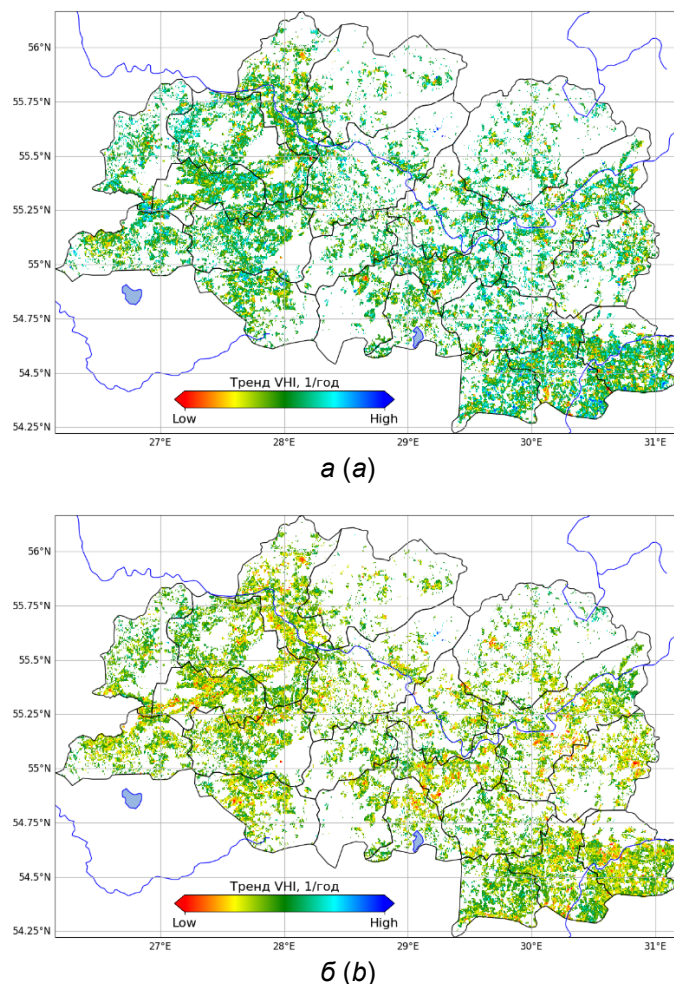


Рис. 6. Карта коэффициента линейного тренда среднего для мая (а) и июня (б) индекса здоровья растений на пахотных землях Витебской области

Fig. 6. Map of the linear trend coefficient of the average vegetation health index for May (a) and June (b) in the croplands of the Vitebsk region

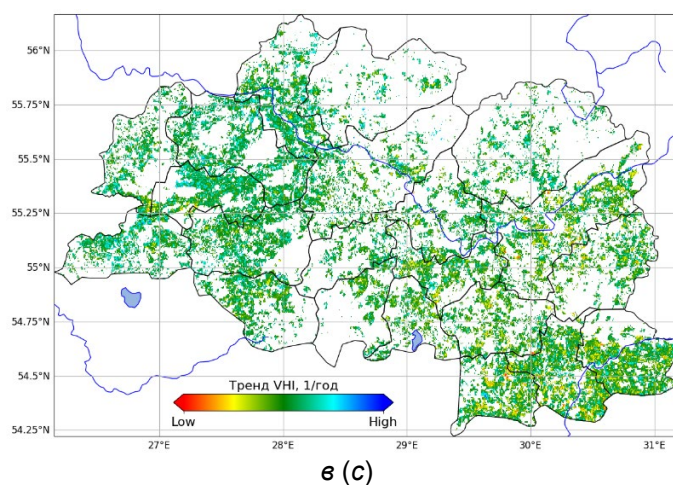
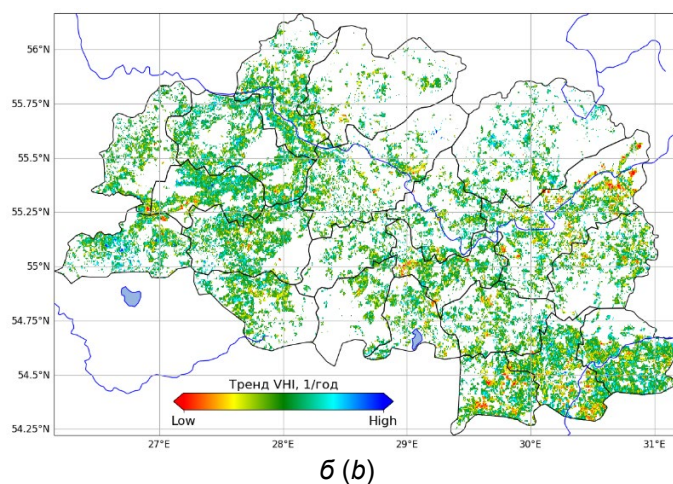
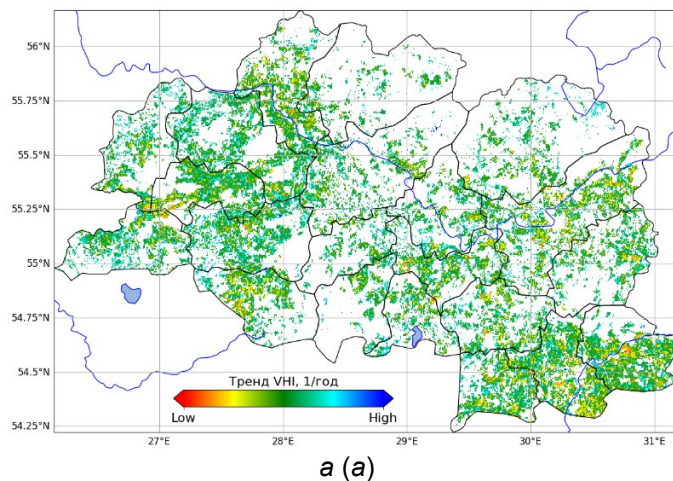


Рис. 7. Карта коэффициента линейного тренда среднего для июля (а), августа (б) и сентября (в) индекса здоровья растений на пахотных землях Витебской области

Fig. 7. Map of the linear trend coefficient of the average for July (a), August (b) and September (c) of the plant health index on arable lands of the Vitebsk region

Распределения трендов VHI на пахотных землях Витебской области для июля, августа и сентября представлены на рис. 7. В июле статистически достоверный рост VHI имеет место для 12 % пахотных земель, статистически достоверное понижение VHI – для 8 %. Отрицательным трендом VHI в большей степени охвачена восточная часть области (см. рис. 7, а), что является следствием более частого возникновения и увеличения продолжительности блокирующих антициклонов над Европейской территорией России в июле – августе.

Пространственное распределение тренда VHI для августа (см. рис. 7, б) также показывает ухудшение агроклиматических условий для сельскохозяйственных культур в восточной части Витебской области, однако в целом по области изменение агроклиматических условий улучшает состояние растений: доли пахотных земель со статистически значимыми положительными и отрицательными трендами VHI составляют 17 и 6 % соответственно.

Отрицательные тренды среднего для сентября VHI отмечаются в основном на востоке области, в западной ее части VHI увеличивается. В целом по области доля пахотных земель со статистически достоверным положительным трендом VHI для сентября составляет 17,5 %, тогда как статистически достоверный отрицательный тренд VHI охватывает лишь 3,8 % пахотных земель.

Закключение. Современные средства дистанционного зондирования Земли и облачные технологии анализа разновременных геопространственных данных позволяют объективно оценивать распределения почвенной и сельскохозяйственной засух различной интенсивности и тем самым прогнозировать возможные потери урожая и ущерб в масштабах всего государства. Для более точной и детализированной геопространственной оценки влажности поверхностного слоя почвы по данным микроволнового зондирования Земли необходимы дополнительные измерения дневной и ночной температур подстилающей поверхности и получение калибровочного уравнения, устанавливающего связь косвенных индикаторов влажности почвы с результатами ее полевых измерений (в отсутствии таковых для этой цели может использоваться реанализ ERA5-Land). Сопоставление текущих оценок влажности почвы, вегетационного индекса и температуры подстилающей поверхности с их минимальными и максимальными значениями для заданного времени года позволяет определить категорию засухи (от слабой до экстремальной) и процент охваченных ею сельскохозяйственных земель.

Анализ многолетних изменений индекса здоровья растений (VHI), рассчитываемого по соотношениям вегетационного индекса NDVI и температуры подстилающей поверхности с их минимальными и максимальными значениями, показывает, что на территории Белорусского Поозерья происходят заметные изменения условий вегетации, выражающиеся в усилении температурного и водного стресса у растений в отдельные фазы вегетационного периода.

Наибольшее ухудшение условий вегетации на всей территории Белорусского Поозерья отмечается для июня. Доля пахотных земель Витебской области со статистически достоверным отрицательным трендом VHI для этого месяца составляет 21 %.

В июле и августе отрицательные последствия изменения климата, связанные с более частым образованием мощных блокирующих антициклонов над Европейской территорией России, проявляются преимущественно в восточной части Витебской области, где отмечается статистически значимое понижение VHI. В западной части области тренды VHI в основном положительные, что говорит об улучшении температурно-влажностных условий вегетации.

Отмеченные в работе геопространственные особенности влияния изменений климата на состояние сельскохозяйственных растений на территории Белорусского Поозерья в различные месяцы вегетационного периода могут использоваться для оптимизации структуры посевных площадей с целью более эффективного использования нового агроклиматического потенциала области и для разработки стратегии адаптации сельского хозяйства к изменению климата.

Полученные результаты исследований использованы при выполнении задания «Выполнить типизацию почв сельскохозяйственных земель Белорусского Поозерья по степени уязвимости к климатическим изменениям и предложить систему адаптивных мероприятий по снижению их негативных последствий в регионе» подпрограммы 01 «Устойчивое природопользование, инновационные технологии переработки, охраны и воспроизводства природных ресурсов» государственной научно-технической программы «Зеленые технологии ресурсопользования и экобезопасности», 2021–2025 гг.

Список использованных источников

1. Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. С. Хомич [и др.] // Известия РАН. Серия географическая. – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 515–527.
2. Лысенко, С. А. Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в Белорусско-Украинском Полесье / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, П. О. Зайко // Метеорология и гидрология. – 2022. – Т. 47, № 1. – С. 59–71.
3. Лысенко, С. А. Численное моделирование микроклимата повторно заболачиваемых земель Белорусского Полесья / С. А. Лысенко // Доклады НАН Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 3. – С. 238–246.
4. Лысенко, С. А. Оценки современных изменений биоклиматических параметров почвенно-растительного покрова Гомельской области / С. А. Лысенко, М. А. Хитриков // Природные ресурсы. – 2024. – № 2. – С. 17–29.
5. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – Изд. 2-е. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
6. Lysenko, S. A. Scenario forecasts of the climate change in Belarus based on regionally adapted ensembles of CMIP6 climate models / S. A. Lysenko // Russian Meteorology and Hydrology. – 2025. – Vol. 50. – P. 584–595.
7. Hanes, J. M. Biophysical applications of satellite remote sensing / J. M. Hanes, X. Zhang, W. Ni-Meister. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2014. – 230 p.
8. Tang, H. Quantitative remote sensing in thermal infrared / H. Tang, Z. Li. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2014. – 281 p.
9. Contribution of Land Surface Temperature (T_{CI}) to Vegetation Health Index: A comparative study using clear sky and all-weather climate data records / V. Bento, I. F. Trigo, C. Gouveia, C. C. Dacamara // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, № 9. – P. 13–24.
10. Holzman, M. E. Subsurface soil moisture estimation by VI-LST method / M. E. Holzman, R. Rivas, M. Bayala // IEEE Geoscience and remote sensing letters. – 2014. – Vol. 11, № 11. – P. 1951–1955.
11. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations / A. Karnieli, N. Agam, R. Pinker [et al.] // Journal of Climate. – 2010. – Vol. 23, № 3. – P. 618–633.
12. Soil moisture estimation with microwave remote sensing: a systematic review and meta-analysis / N. Xu, A. Daccache, A. Ahmadi [et al.] // International Journal of Digital Earth. – 2025. – Vol. 18, № 1. – P. 1–27.
13. Soil moisture retrieval techniques using satellite remote sensing / A. K. Kasaragod, R. Setia, D. K. Pandey [et al.] // Geospatial Technologies for Crops and Soils / T. Mitran, R. S. Meena, A. Chakraborty (eds). – Singapore : Springer, 2020. – P. 357–385.
14. An inclusive approach to crop soil moisture estimation: Leveraging satellite thermal infrared bands and vegetation indices on Google Earth engine / F. Imtiaz, A. A. Farooque, G. S. Randhawa [et al.] // Agricultural Water Management. – 2024. – Vol. 306, № 6.
15. Li, S. Regional soil moisture estimation leveraging multi-source data fusion and automated machine learning / S. Li, P. Zhu, N. Song, C. Li, J. Wang // Remote Sensing. – 2025. – Vol. 17. – P. 837.
16. Soil moisture estimates at 1 km resolution making a synergistic use of sentinel data / R. Madelon, N. J. Rodriguez-Fernandez, H. H. Bazzi [et al.] // Hydrology and Earth System Sciences. – 2023. – Vol. 27, № 6. – P. 1221–1242.
17. Клещенко, А. Д. Оценка возможности использования спутниковой информации для мониторинга засух на территории южных регионов России / А. Д. Клещенко, О. В. Савицкая // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2024. – № 3 (393). – С. 142–157.
18. Kogan, F. N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas / F. N. Kogan // International Journal of Remote Sensing. – 1990. – Vol. 11, № 8. – P. 1405–1419.
19. Kogan, F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection / F. N. Kogan // Advances in Space Research. – 1995. – Vol. 15, № 11. – P. 91–100.
20. Kogan, F. N. World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices / F. N. Kogan // EOS Transactions of the American Geophysical Union. – 2002. – Vol. 83, № 48. – P. 557–563.
21. An improved global vegetation health index dataset in detecting vegetation drought / J. Zeng, T. Zhou, Y. Qu [et al.] // Scientific Data. – 2023. – Vol. 10, iss. 1. – P. 338.
22. Jackson, T. J. Vegetation effects on the microwave emission from soils / T. J. Jackson, T. J. Schmugge // Remote Sensing of Environment. – 1991. – Vol. 36. – P. 203–212.
23. SMAP handbook – soil moisture active passive: Mapping soil moisture and freeze/thaw from space / D. Entekhabi, S. Yueh, P. O'Neill [et al.] ; SMAP Project, Jet Propulsion Laboratory. – Pasadena, CA, 2014. – 211 p.

References

1. Loginov V. F., Lysenko S. A., Khomich V. S. et al. *Priznaki aridizacii klimata i ih ekosistemnye proyavleniya na territorii Belarusi* [Signs of climate aridization and their ecosystem manifestations on the territory of Belarus]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2021, vol. 85, no. 4, pp. 515–527. (in Russian)
2. Lysenko S. A., Loginov V. F., Zaiko P. O. *Vliyanie izmenenij klimata na bioproduktivnost' nazemnyh ekosistem v Belorussko-Ukrainskom Poles'e* [Climate change impacts on bioproductivity of terrestrial ecosystems in the Belarusian-Ukrainian Polesie region]. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2022, no. 1, pp. 59–71. (in Russian)
3. Lysenko S. A. *Chislennoe modelirovanie mikroklimata povtorno zabolachivaemyh zemel' Belorusskogo Poles'ya* [Numerical modeling of microclimate of re-waterlogged lands of Belarusian Polesie]. *Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 3, pp. 238–246. (in Russian)
4. Lysenko S. A., Khitrykau M. A. *Ocenki sovremennyh izmenenij bioklimaticheskikh parametrov pochvenno-rastitel'nogo pokrova Gomel'skoj oblasti* [Estimation of modern changes in the bioclimatic characteristics of the soil and plant cover of the Homiel region]. *Prirodnye resursy = Natural Resources*, 2024, no. 2, pp. 17–29. (in Russian)
5. Loginov V. F., Lysenko S. A., Melnik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, and control possibilities]. 2nd ed., Minsk, Encyclopedics Publ., 2020, 264 p. (in Russian)
6. Lysenko S. A. Scenario forecasts of the climate change in Belarus based on regionally adapted ensembles of CMIP6 climate models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2025, vol. 50, pp. 584–595.
7. Hanes J. M., Zhang X., Ni-Meister W. *Biophysical applications of satellite remote sensing*, Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 2014, 230 p.
8. Tang H., Li Z. *Quantitative remote sensing in thermal infrared*. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag Publ., 2014, 281 p.
9. Bento V., Trigo I. F., Gouveia C., Dacamara C. C. Contribution of Land Surface Temperature (T_{LS}) to Vegetation Health Index: A comparative study using clear sky and all-weather climate data records. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, no. 9, pp. 13–24.
10. Holzman M. E., Rivas R., Bayala M. Subsurface soil moisture estimation by VI-LST method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, vol. 11, no. 11, pp. 1951–1955.
11. Karnieli A., Agam N., Pinker R. et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of Climate*, 2010, vol. 23, no. 3, pp. 618–633.
12. Xu N., Daccache A., Ahmadi A. et al. Soil moisture estimation with microwave remote sensing: a systematic review and meta-analysis. *Int. J. Digit. Earth*, 2025, vol. 18, no. 1, pp. 1–27.
13. Kasaragod A. K., Setia R., Pandey D. K. et al. Soil moisture retrieval techniques using satellite remote sensing. Mitran T., Meena R. S., Chakraborty A. (eds). *Geospatial technologies for crops and soils*. Singapore, Springer Publ., 2020, pp. 357–385.
14. Imtiaz F., Farooque A. A., Randhawa G. S. et al. An inclusive approach to crop soil moisture estimation: Leveraging satellite thermal infrared bands and vegetation indices on Google Earth Engine. *Agricultural Water Management*, 2024, vol. 306, no. 6.
15. Li S., Zhu P., Song N., Li C., Wang J. Regional soil moisture estimation leveraging multi-source data fusion and automated machine learning. *Remote Sensing*, 2025, vol. 17, p. 837.
16. Madelon R., Rodriguez-Fernandez N. J., Bazzi H. H. et al. Soil moisture estimates at 1 km resolution making a synergistic use of sentinel data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 1221–1242.
17. Kleshchenko A. D., Savitskaya O. V. *Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya sputnikovoj informacii dlya monitoringa zasuh na territorii yuzhnyh regionov Rossii* [Assessment of the possibility of using satellite information for monitoring droughts in the southern regions of Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological Research and Forecasts*, 2024, no. 3 (393), pp. 142–157. (in Russian)
18. Kogan F. N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, vol. 11, no. 8, pp. 1405–1419.
19. Kogan F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 1995, vol. 15, no. 11, pp. 91–100.
20. Kogan F. N. World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices. *EOS Transactions of the American Geophysical Union*, 2002, vol. 83, no. 48, pp. 557–563.
21. Zeng J., Zhou T., Qu Y. et al. An improved global vegetation health index dataset in detecting vegetation drought. *Scientific Data*, 2023, vol. 10, iss. 1, p. 338.
22. Jackson T. J., Schmugge T. J. Vegetation effects on the microwave emission from soils. *Remote Sensing of Environment*, 1991, vol. 36, pp. 203–212.
23. Entekhabi D., Yueh S., O'Neill P. et al. SMAP handbook – soil moisture active passive: Mapping soil moisture and freeze/thaw from space. *SMAP Project*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 2014, 211 p.

Информация об авторах

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

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

Буяков Иван Васильевич – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь)

Information about the authors

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

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)

УДК 504.453.06(1/9)

Поступила в редакцию 08.10.2025

Received 08.10.2025

ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МАЛЫХ РЕК ПРИГОРОДНОЙ ЗОНЫ МИНСКА

М. И. Струк, С. Г. Живнач, Г. М. Бокая

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Приведена оценка химического загрязнения пяти малых рек пригородной зоны Минска, на которых построены водохранилища, используемые для отдыха городского населения. Определены факторы загрязнения, обусловленные расходами воды в реках и экологическим состоянием их водосборных бассейнов.

Выделены основные каналы поступления в реки загрязняющих веществ, представленные для большей их части поверхностным стоком, что вызвано преобладанием возвышенных ландшафтов в ландшафтной структуре соответствующих бассейнов. Выявлены особенности пространственной организации землепользования и размещения техногенных объектов – источников загрязнения вод в пределах бассейнов и на прибрежных территориях.

На основе данных собственных полевых гидрохимических исследований авторов, проведенных в 2009-2024 гг., оценены интенсивность и вещественный состав загрязнения, отражающие основной вклад в него биогенных веществ: нитритов, азота аммонийного и фосфора фосфатов, с повторяемостью для различных рек от 33 до 100 % случаев, а также превышения для большинства из них среднегодовых концентраций по нитритам и азоту аммонийному. Установлена зависимость загрязнения от расходов воды, хозяйственного использования бассейнов, размещения лесов в их пределах.

Представлены приоритетные меры по снижению загрязнения рассматриваемых рек, предусматривающие разработку и реализацию для каждой из них специальных планов управления бассейнами с преимущественной ориентацией на уменьшение загрязняющего влияния сельскохозяйственных и селитебных земель.

Ключевые слова: малые реки; водосборные бассейны; химическое загрязнение; биогенные вещества; антропогенное эвтрофирование; водоохранные меры.

Для цитирования: Струк М. И., Живнач С. Г., Бокая Г. М. Оценка химического загрязнения малых рек пригородной зоны Минска // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 36–45.

ASSESSMENT OF CHEMICAL POLLUTION OF SMALL RIVERS IN THE MINSK SUBURBAN AREA

M. I. Struk, S. G. Zhivnach, G. M. Bokaya

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

Annotation. An assessment of chemical pollution of five small rivers in the Minsk suburban area, where built reservoirs for recreation by the city's population, is presented. The pollution factors caused by water flow in the rivers and the ecological state of their catchment areas are identified.

The main channels for pollutant influx into the rivers are identified, primarily through surface runoff, due to the predominance of elevated landscapes in the landscape structure of the respective basins. Features of the spatial organization of land use and the location of man-made objects-sources of water pollution-within the basins and in coastal areas are identified.

The intensity and composition of the pollution were assessed based on the authors' own hydrochemical field studies conducted between 2009 and 2024. These data reflect the primary contributions of biogenic substances: nitrites, ammonium nitrogen, and phosphate phosphorus, with a frequency of 33% to 100% for various rivers. They also show that for most of them, nitrite and ammonium nitrogen concentrations exceed average annual values. The relationship between pollution and water flow, economic use of the basins, and the distribution of forests within them is established.

Priority measures to reduce pollution in the rivers under consideration are presented, including the development and implementation of special basin management plans for each river, with a primary focus on reducing the polluting impact of agricultural and residential lands.

Keywords: small rivers; catchment basins; chemical pollution; biogenic substances; anthropogenic eutrophication; water protection measures.

For citation. Struk M. I., Zhivnach S. G., Bokaya G. M. Assessment of chemical pollution of small rivers in the Minsk suburban area. *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 36–45.

Введение. Для удовлетворения водохозяйственных и рекреационных потребностей крупнейшего города используются водные объекты не только собственно городской, но и прилегающей к нему территории. Наличие таких объектов, а также их свойства зависят от ее природно-ландшафтных условий.

Основной особенностью ландшафтного строения пригородной зоны Минска является ее размещение в пределах Минской возвышенности и прилегающих к ней равнин. На центральную часть данной зоны приходятся ландшафтные районы холмисто-моренно-эрозионных и камово-моренно-эрозионных возвышенностей с самыми высокими в Беларуси гипсометрическими отметками [1]. По их территории в северо-западном направлении от города проходит главная водораздельная линия водосборных бассейнов двух морей – Балтийского и Черного. Она делит пригородную зону на две части: северо-западную и юго-восточную. К первой из них относятся бассейны двух больших рек – Немана и его притока Вилии, ко второй – р. Березины и ее притока – р. Свислочи, а также р. Птичи – притока р. Припяти.

С отмеченным ландшафтным строением пригородной зоны связано отсутствие в ее пределах больших естественных водотоков и водоемов. Протекающие здесь реки представлены лишь верховьями и относятся к категории малых. На этих реках построены водохранилища, выступившие ядрами создания крупных зон отдыха и оздоровления городского населения.

Экологическое состояние указанных водохранилищ зависит от качества вод наполняющих их рек, из чего следует важность его изучения. К числу приоритетных проблем в данном отношении относится проблема химического загрязнения водных объектов.

Вопросы оценки подобного рода загрязнения применительно к рассматриваемой территории исследованы в ранее выполненных работах [2–5]. Они затрагивают определение его интенсивности, сезонные особенности, вещественный состав, динамику. Объектами изучения выступают отдельные реки, и основное внимание уделено их биогенному загрязнению.

В то же время для организации эффективной водоохраной деятельности на исследуемой территории целесообразно проведение обобщающего исследования применительно ко всему набору наиболее значимых пригородных рек и включающему более широкий спектр химических загрязнителей. Кроме того, использовавшаяся ранее база данных о загрязнении речных вод была пополнена новыми материалами, относящимися к 2023–2024 гг.

Целью исследования выступила оценка химического загрязнения малых рек пригородной зоны Минска. Для ее достижения решались задачи по определению предпосылок загрязнения, его вещественного состава и интенсивности, а также обоснованию водоохраных мер.

Объектом изучения выступили пять малых рек: Вяча, Волма, Тростянка, Усяжа и Птичь, на которых создана большая часть основных пригородных рекреационных водохранилищ (за исключением каскада водоемов, сооруженных на р. Свислочи). Все исследуемые реки относятся к бассейну Черного моря, в том числе четыре первые – крупной р. Березины, пятая – р. Припяти. Располагаются они по различным направлениям от г. Минска.

Материалы и методы исследования. Фактическую основу исследования составили выполненные в период 2010–2024 гг. данные полевых изысканий авторов. В процессе работы были отобраны водные пробы, а затем проведен их химический анализ.

Отбор водных проб осуществляли во все сезоны года. Его места располагали в речных створах, расположенных выше водохранилищ, с тем чтобы определить влияние рек на качество их вод. Всего взято и проанализировано 105 проб. Их количество по различным рекам сходное и составляет в среднем 20 проб.

Химический анализ воды проводили по показателям, отражающим содержание в ней элементов основного солевого состава, таким как общая минерализация, кальций, магний, натрий, калий, хлор, железо, сульфаты, карбонаты; физических свойств и газового состава: взвешенные вещества, цветность, перманганатная окисляемость; биогенные вещества: нитраты, нитриты, азот аммонийный, фосфор фосфатов; кислотность (рН). Загрязнение воды определяли по каждому из них с использованием двух критериев: во-первых, ПДК химических и иных веществ в воде поверхностных водных объектов [6]; во-вторых, экологических показателей, характеризующих качество водных объектов [7, 8].

Для оценки экологически значимых свойств водосборных бассейнов использовали материалы дистанционного зондирования Земли. В качестве исходных данных для анализа были взяты общегеографическая основа и векторные данные, доступные в открытых источниках [9]. Также рассматривали данные, характеризующие виды земель и рельеф.

Результаты и их обсуждение.

Предпосылки загрязнения рек. Для выявления предпосылок загрязнения рассмотрели два основных определяющих его фактора: внутренний и внешний. Первый из них касается расхода воды в реке, от которого зависит ее разбавляющая способность; второй – экологического состояния водосборного бассейна, откуда осуществляется питание реки.

Малые реки отличаются повышенной уязвимостью к загрязнению в сочетании с высокой зависимостью от экологического состояния своих водосборных бассейнов. В рассматриваемом случае оценку химического загрязнения вод проводили на створах, расположенных выше верхнего бьефа водохранилищ, которые приурочены к верхним или средним частям исследуемых малых рек.

Длина всех оцениваемых речных отрезков небольшая и различается пятикратно – от 27 км у р. Вячи до 5 км у р. Тростянки (табл. 1). Четыре реки – Усяжа, Вяча, Волма и Птичь – имеют притоки. По площади водосборных бассейнов и расходам воды самыми высокими и сходными значениями выделяются три реки – Волма, Птичь и Усяжа, у которых эти площади составляют 130–137 км², а расходы – 0,8–0,9 м³/с. Соответственно, данные реки должны обладать самой высокой естественной устойчивостью к загрязнению. Далее отмеченная характеристика будет несколько снижаться для р. Вячи и заметно (двукратно) – для р. Тростянки.

Таблица 1. Гидрологические параметры малых рек пригородной зоны Минска

Table 1. Hydrological parameters of small rivers in the Minsk suburban area

Река	Длина до верхнего бьефа водохранилища, км	Количество притоков	Расход воды, м ³ /с	Площадь водосборного бассейна, км ²
Вяча	20	1	0,7	98
Усяжа	15	2	0,9	130
Волма	14	1	0,9	137
Тростянка	5	–	0,4	55
Птичь	27	1	0,8	132

Для оценки влияния водосборных бассейнов на загрязнение рек следует учитывать, во-первых, каналы поступления загрязняющих веществ с их территории – поверхностный или подземный сток; во-вторых, соотношение и размещение по отношению к реке естественных экосистем, имеющих водоохранное значение, с одной стороны, и объектов – источников загрязнения, с другой. В первом случае подобный учет может быть обеспечен путем анализа ландшафтной структуры бассейнов, во втором – структуры землепользования.

В ландшафтной структуре бассейнов четырех из пяти рек – Птичи, Усяжи, Вячи и Волмы – преобладают возвышенные ландшафты, причем у первых трех они занимают более 3/4 площади (табл. 2). Данные ландшафты отличаются высокой естественной защищенностью грунтовых вод и большей подверженностью почвенной эрозии.

Таблица 2. Ландшафтно-экологические условия водосборных бассейнов малых рек пригородной зоны Минска

Table 2. Landscape and ecological conditions of the catchment areas of small rivers in the Minsk suburban area

Река	Структура, %							Средний смыв почвы, т/га
	ландшафтов			видов земель				
	возвы- шенных	средне- высотных	низинных	лесных	сельскохозяй- ственных	селитеб- ных	прочих	
Вяча	77	–	23	58	26	11	5	4,9
Усяжа	93	–	7	40	37	14	9	4,8
Волма	54	35	11	57	23	14	6	4,7
Тростянка	11	76	13	26	41	27	6	3,1
Птичь	94	–	6	19	67	9	5	6,9

Для количественной оценки эрозионной опасности бассейнов рассчитаны показатели потенциального смыва почв с их территории. Источником данных послужила карта уклонов местности, построенная по материалам спутниковых снимков [10].

Выполненные расчеты показали, что самый высокий смыл почв имеет место в бассейне р. Птичь – около 7 т/га, где доля возвышенных ландшафтов наивысшая, затем, по мере уменьшения этой доли, он снижается почти в 1,5 раза в бассейнах рек Вячи, Усяжи, Волмы и более чем двукратно в бассейне р. Тростянки. В связи с этим для четырех первых бассейнов основным каналом поступления загрязняющих веществ в реки выступает поверхностный сток.

В бассейне р. Тростянки ведущее положение принадлежит средневисотным ландшафтам, менее распространены низинные и еще менее – возвышенные ландшафты. Средневисотные и низинные ландшафты характеризуются невысокой эрозионной опасностью и более низкой по сравнению с возвышенными естественной защищенностью грунтовых вод. Поэтому для рассматриваемого бассейна большее значение получит перенос загрязняющих веществ в реку с подземным стоком.

По соотношению различных видов земель рассматриваемые бассейны можно разделить на три группы. Первую из них составляют бассейны рек Вячи и Волмы, у которых более половины территории занимают леса, в силу чего они обладают самым высоким естественным водоохраным потенциалом. Вторую – бассейн р. Усяжи с умеренной лесистостью (40 %), третью – рек Птичи и Тростянки с низкой лесистостью (менее 30 %). В соответствии с отмеченным уменьшением лесистости бассейнов снижается и их водоохраный потенциал.

Степень хозяйственного освоения бассейнов является величиной обратной их лесистости. В бассейнах рек Птичи и Тростянки совместно на сельскохозяйственные и селитебные земли приходится более 2/3 площади. Особенно высокий уровень сельскохозяйственного освоения отмечается в бассейне р. Птичи – 62 %, а селитебной застройки – в бассейне р. Тростянки – 30 %, большая часть из которой относится к г. Минску. В бассейне р. Усяжи данные виды земель занимают половину, а рек Вячи и Волмы – примерно 1/3 площади.

В рассматриваемых бассейнах рек не имеется объектов, осуществляющих сброс в них сточных вод. Основными источниками загрязнения этих рек выступают сельскохозяйственные земли с расположенными на них животноводческими фермами, а также населенные пункты, в основном сельские. В бассейне р. Тростянки помимо таковых крупным источником загрязнения подземных вод является полигон складирования коммунальных отходов «Тростенецкий» и поверхностных вод – территория г. Минска.

Удаление указанного полигона от реки составляет около 2 км, и уклон поверхности направлен в ее сторону. В районе его размещения отмечается существенное загрязнение подземных вод. Они характеризуются минерализацией 16–22 г/дм³ и концентрациями большинства макрокомпонентов, превышающими в десятки и сотни раз фоновые значения природных вод. Концентрации натрия в фильтрате полигона достигает 8–20 ПДК, хлоридов – 9–25, сульфатов – до 3 ПДК [11, 12].

Наряду со структурой земель на поступление загрязняющих веществ в реки оказывает влияние также пространственное распределение по территории бассейнов различных их видов и объектов-загрязнителей. Для видов, занимающих наибольшие площади – лесных, сельскохозяйственных, селитебных, оно повсеместно имеет мозаичный характер (рис. 1).

Особенно значимым является указанное распределение в непосредственной близости от самих рек. Для его оценки рассчитаны показатели прибрежного размещения сельскохозяйственных и селитебных земель как источников загрязнения и лесов как природных объектов, выполняющих водоохранную роль (табл. 3).

Таблица 3. Видовая структура земель, непосредственно прилегающих к малым рекам пригородной зоны Минска, %

Table 3. Species structure of lands directly adjacent to small rivers in the Minsk suburban area, %

Река	Вид земель, %			
	Лесные	Сельскохозяйственные	Селитебные	Прочие
Вяча	34	43	22	1
Усяжа	30	44	23	3
Волма	54	27	17	2
Тростянка	5	32	61	2
Птичь	11	54	34	1

Прибрежное размещение лесов на большем протяжении отмечается только у одной реки – Волмы. У трех рек – Вячи, Усяжи и Птичи – преобладающим видом прибрежных земель являются сельскохозяйственные земли, у р. Тростянки – селитебные земли. Для четырех из пяти рек, за исключением Волмы, доля прибрежной полосы, занятой лесами, является ниже средней по бассейну величины, в чем находит отражение приуроченность сельских поселений и окружающих их сельскохозяйственных земель к рекам.

Вблизи отдельных сельских поселений расположены животноводческие фермы. Они находятся в бассейнах трех рек – Вячи, Усяжи и Птичи.



Рис. 1. Размещение видов земель и источников загрязнения вод в бассейнах малых рек пригородной зоны Минска. Виды земель: 1 – лесные; 2 – сельскохозяйственные; 3 – селитебные; 4 – животноводческие фермы; 5 – автомобильные дороги

Fig. 1. Distribution of land types and water pollution sources in the basins of small rivers in the Minsk suburban area.
Land types: 1 – forest; 2 – agricultural; 3 – residential; 4 – farms; 5 – roads

Химическое загрязнение речных вод и водоохранные меры. Обобщающим показателем гидрохимического состава рек является общая минерализация воды. Величина этого показателя существенно различается. Для четырех из пяти рек она изменяется в 1,6 раза – от 273,7 (р. Вяча) до 384,5 мг/дм³ (р. Птичь) (табл. 4). Максимально высокой является эта величина у р. Тростянки, где общая минерализация воды превышает аналогичные показатели остальных рек в 2,0–3,3 раза (788,8 мг/дм³). У этой же реки отмечается трансформация класса воды с гидрокарбонатного кальциевого на хлоридно-гидрокарбонатно-натриевый.

Таблица 4. Содержание химических веществ в воде малых рек пригородной зоны Минска, мг/дм³

Table 4. The content of chemical substances in the water of small rivers in the Minsk suburban area, mg/dm³

№ п/п	Показатель	Река					Всего
		Вяча	Усяжа	Волма	Тростянка	Птичь	
1	Общая минерализация	273,7	360,1	286,9	788,8	384,5	1000
2	Гидрокарбонаты	170,46	212,24	171,76	387,01	246,12	–
3	Хлориды	14,47	30,51	11,93	133,55	21,48	300
4	Сульфаты	11,8	19,1	19,5	28,0	22,6	100
5	Нитраты	4,6	8,1	9,3	11,9	12,5	40
6	Нитриты	0,049	0,162	0,069	0,531	0,135	0,08
7	Фосфор фосфатов	0,054	0,019	0,028	0,023	0,072	0,066
8	Азот аммонийный	0,33	0,15	0,44	11,97	0,18	0,39
9	Кальций	39,66	44,37	47,42	56,96	56,00	180
10	Магний	14,49	22,29	14,7	24,43	20,62	40
11	Натрий	7,0	17,6	5,3	106,5	9,6	120
12	Калий	3,6	2,7	1,4	30,4	4,0	50
13	Железо общее	0,20	0,17	0,14	0,25	0,15	–
14	pH	7,68	7,95	7,98	7,51	7,78	6,5–8,5
15	Перманганатная окисляемость, мгО/дм ³	6,3	4,5	4,7	7,7	3,4	–
16	Цветность, градусы	70	40	44	90	29	100

Примечание. Полужирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК.

Река Тростянка характеризуется также более высокими значениями четырнадцати из шестнадцати рассматриваемых показателей. Исключение составляют нитраты и фосфор фосфатов, наивысшая концентрация которых фиксируется в р. Птичи. Самые низкие показатели по отдельным веществам наблюдаются у двух рек – Вячи (7 показателей) и Волмы (5 показателей), у двух остальных – Усяжи и Птичи – отмечается по 2 таких показателя.

Кислотность воды у всех рек сходная. Она повсеместно относится к слабощелочной.

Превышения среднегодовых концентраций ПДК наблюдаются только по биогенным веществам: нитритам и азоту аммонийному у четырех из пяти рек (кроме р. Вячи). Максимальных значений они достигают у р. Тростянки, составляя 30,2 раза по азоту аммонийному и 6,6 раза по нитритам, в то время как у остальных рек – только до 2,0 раза.

Применительно к разовым наблюдениям доля всех водных проб, в которых фиксировались превышения ПДК хотя бы по одному из веществ, является довольно высокой, составляя почти 2/3 от их общего количества (табл. 5). Основную роль в данном отношении играют соединения азота нитритного и азота аммонийного, по каждому из которых отмечены повышенные концентрации в третьей части проб, по фосфору фосфатов – в пятой, по остальным семи веществам эта доля не превышает 10 %.

Среди рек самая высокая повторяемость случаев загрязнения отмечается у р. Тростянки, где она достигает 100 %, далее следует р. Птичь – 83 %. Наименьшая величина данного показателя – менее 40 % – присуща рекам Усяжи и Волме.

В приведенной повторяемости химического загрязнения вод рассматриваемых рек в целом находит отражение его зависимость как от расходов воды, так и от уровня хозяйственного освоения водосборов. Реки с максимальными значениями повторяемости – Тростянка и Птичь – отличаются наивысшим освоением, а первая также самыми низкими расходами.

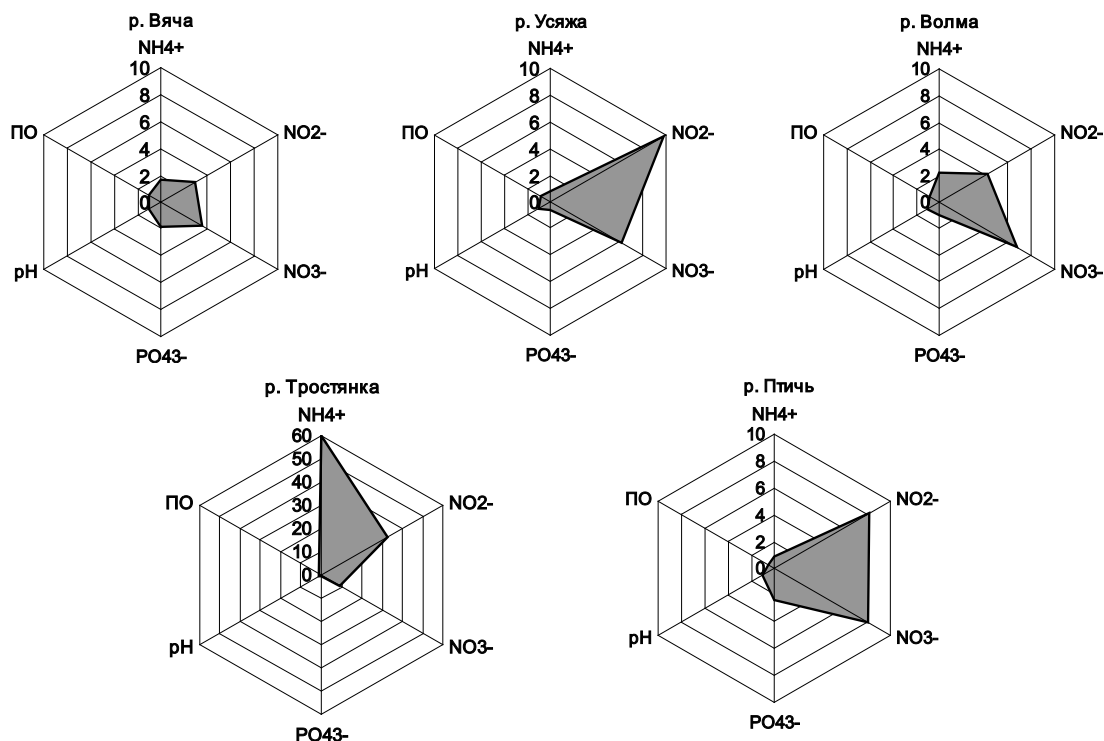
Влияние лесистости водосборных бассейнов на загрязнение рек не является однозначно выраженным. Более высокий ее уровень не обязательно обеспечивает меньшую степень загрязнения. Так, у рек с примерно одинаковыми расходами воды – Вячи и Усяжи – лесистость бассейна первой в 1,5 раза выше второй, при этом повторяемость загрязнения у нее не только не ниже, но и на четверть выше.

Таблица 5. Частота превышения ПДК химических веществ в воде малых рек пригородной зоны Минска, %**Table 5. Frequency of exceeding the MAC of chemical substances in the water of small rivers in the Minsk suburban area, %**

№ п/п	Показатель	Река					Всего
		Вяча	Усяжа	Волма	Тростянка	Птичь	
1	Общая минерализация	–	–	–	12	–	3
2	Хлориды	–	–	–	4	–	1
3	Нитриты	20	28	28	73	17	35
4	Фосфор фосфатов	20	6	11	12	48	20
5	Азот аммонийный	20	6	11	96	9	32
6	Магний	–	–	–	4	–	1
7	Натрий	–	–	–	38	–	10
8	Калий	–	–	–	19	–	5
9	Железо общее	10	6	6	8	9	8
10	Цветность	5	–	6	23	–	8
11	pH	–	17	17	4	9	9
Всего выше ПДК		55	44	33	100	83	67

Большее водоохранное значение по сравнению с лесистостью имеет прибрежное размещение лесов. Самым высоким является данный показатель у р. Волмы. В частности, он превышает таковой сходной по расходу воды и лесистости р. Вячи в 1,7 раза. Одновременно повторяемость загрязнения первой во столько же раз ниже.

Для определения подверженности водных объектов эвтрофированию отдельно использовали экологический критерий, устанавливающий пороговые значения, при соблюдении которых данный процесс не получает развития. Для исследуемых рек выполнили сопоставление указанных значений с показателями среднегодовых концентраций эвтрофирующих веществ (рис. 2). Помимо содержания биогенных веществ в составе экологических показателей рассмотрели уровень pH и перманганатную окисляемость.

**Рис. 2. Превышение экологических норм концентрации в воде малых рек пригородной зоны Минска (ПО – перманганатная окисляемость)****Fig. 2. Exceeding environmental standards for concentration in the water of small rivers in the suburban area of Minsk (ПО – permanganate oxidizability)**

Из полученных диаграмм следует, что в водах всех рек величины ряда показателей превышают значения, установленные для чистых вод, в то же время в наборе этих показателей по отношению к каждой из них имеются как сходства, так и различия. В частности, для всех рек характерно превышение по азоту нитратному и азоту нитритному. Наиболее высокими его уровнями выделяются в первом случае реки Тростянка и Птичь – в 9 и 8 раз соответственно, во втором – р. Тростянка – в 32 раза. Содержание азота аммонийного существенно превышает экологический норматив только в р. Тростянке – в 60 раз. По фосфору фосфатов превышения наблюдаются для рек Вячи и Птичи. Превышения по показателю перманганатной окисляемости в 1,1–1,3 раза отмечаются для рек Вячи и Тростянки. Значения показателей кислотности воды близки к санитарно-экологическим нормативам.

Указанные превышения экологических норм концентрации эвтрофирующих веществ свидетельствуют о подверженности всех рассматриваемых рек антропогенному эвтрофированию. Степень такой подверженности в целом согласуется с представленным выше их распределением по повторяемости биогенного загрязнения. Она является самой высокой для р. Тростянки, затем следует р. Птичь и далее – остальные реки.

Водоохранные меры. Меры по снижению загрязнения рек реализуются в Беларуси в соответствии с планами управления речными бассейнами. Их разработка предусмотрена для бассейнов всех крупных рек страны: Днепра, Западной Двины, Западного Буга, Немана и Припяти [13].

За последние 5 лет подобного рода планы были утверждены для бассейнов рек Днепра и Припяти, в состав которых входят изучаемые малые реки [14, 15]. В этих планах имеются специальные разделы, посвященные мероприятиям по улучшению экологического состояния поверхностных водных объектов.

Планируемые мероприятия соответствуют масштабам отмеченных речных бассейнов, площади которых составляют: Днепра – 118,4 тыс. км², Припяти – 50,9 тыс. км². Их детализация недостаточна для рассматриваемых малых рек пригородной зоны Минска; в приведенных планах они не упоминаются. Отсутствие такого упоминания не предусматривает выбора этих рек в качестве приоритетных объектов охраны.

Между тем высокая социально-экономическая значимость указанных рек, обеспечивающих рекреационные нужды такого крупного потребителя, как г. Минск, предполагает уделять особое внимание качеству их вод. Достичь этого можно путем дополнения реализуемых планов управления речными бассейнами крупных рек Днепра и Припяти аналогичными локальными планами бассейнов пригородных малых рек.

С учетом выявленных особенностей загрязнения упомянутых рек можно выделить меры по его снижению, во-первых, общие для всех бассейнов, во-вторых, специфические для отдельных из них. К общим относятся меры по уменьшению поступления в реки загрязняющих веществ со стороны сельскохозяйственных земель и населенных пунктов, к специфическим – со стороны техногенных объектов, представленных полигоном складирования отходов и животноводческими фермами.

Уменьшение загрязняющего влияния сельскохозяйственных земель предполагает совершенствование технологий применения удобрений, чтобы минимизировать их поступление в грунтовые воды и смыв с поверхностным стоком; внедрение противозерозионных способов обработки почв, особенно на водосборах с высокой эрозионной опасностью; создание защитных полос в виде травянистой или древесно-кустарниковой растительности в ложбинах стока. Приведенные меры могут быть запланированы в рамках реализации стратегического направления устойчивого развития сельского хозяйства, предусматривающего его перевод на ландшафтно-адаптированные системы землепользования.

Для населенных пунктов, в первую очередь занимающих приречное положение, и животноводческих ферм необходимо поддержание благоприятного санитарного состояния. В бассейне р. Тростянки существенное водоохранное значение имеет создание противифльтрационной завесы со стороны полигона коммунальных отходов «Тростенецкий».

Заключение. Размещение малых рек пригородной зоны Минска с водосборными бассейнами преимущественно в пределах возвышенных ландшафтов обуславливает поверхностный сток в качестве главного канала поступления в них загрязняющих веществ, основными источниками которых выступают сельскохозяйственные и селитебные земли, животноводческие фермы и полигон коммунальных отходов.

Загрязнение речных вод характеризуется довольно высокой интенсивностью: среднее превышение ПДК фиксируется в 2/3 проб всего по 11 веществам, из которых наибольший вклад вносят биогенные вещества, такие как нитриты и азот аммонийный – по 1/3 и фосфор фосфатов – 1/5 часть проб; для большинства рек (Тростянка, Усяжа, Волма, Птичь) отмечаются превышения среднегодовых концентраций по нитритам и азоту аммонийному.

Интенсивность загрязнения в целом зависит от расходов воды рек и степени хозяйственного освоения их водосборных бассейнов – наибольшие ее уровни имеют место в бассейнах рек Тростянки (100 % проб) и Птичи (83 %), у которых совместная доля сельскохозяйственных и селитебных земель превышает 2/3, лесистость составляет не более 1/4 площади, а расход воды первой в 2 раза меньше, чем у остальных рек.

Водоохранная роль лесов проявляется в большей мере в случае их размещения на непосредственно прилегающей к реке территории: минимальная повторяемость загрязнения (в 2 раза ниже средней) выявлена для р. Волмы, у которой более половины прибрежной территории занято лесами, в то время как у остальных рек их доля изменяется от 5 до 34 %.

Оптимальным способом снижения загрязнения малых рек пригородной зоны Минска могут выступить разработка и реализация для них специальных планов управления бассейнами с преимущественной ориентацией на уменьшение загрязняющего влияния сельскохозяйственных и селитебных земель, а для р. Тростянки – полигона коммунальных отходов.

Список использованных источников

1. Ландшафтная карта Беларуси. М. 1 : 500 000. – Минск, 2014.
2. Струк, М. И. Геоэкологическая оценка пригородных водохранилищ Минска / М. И. Струк, С. Г. Живнач, Г. М. Бокая // Природопользование. – Минск, 2013. – Вып. 23. – С. 115–124.
3. Струк, М. И. Геоэкологическая оценка водосборного бассейна водохранилища Птичь / М. И. Струк, С. Г. Живнач, Г. М. Бокая // Геология и минерально-сырьевые ресурсы запада Восточно-Европейской платформы: проблемы изучения и рационального использования : материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 215-летию со дня рожд. И. Домейко, 31 июля – 3 авг. 2017 г. / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: А. К. Карабанов [и др.]. – Минск : СтройМедиаПроект, 2017. – С. 329–332.
4. Струк, М. И. Биогенное загрязнение вод Петровического водохранилища / М. И. Струк, С. Г. Живнач // Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно-методическое обеспечение и практическое решение : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию НИЛ лаборатории экологии ландшафтов факта геогр. и геоинформатики БГУ, г. Минск, 9–11 нояб. 2022 г. / Бел. гос. ун-т, фак-т географии и геоинформатики ; редкол. : Д. С. Воробьев (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2022. – С. 438–442.
5. Струк, М. И. Ландшафтно-экологическая оценка водосборных бассейнов пригородных водохранилищ Минска / М. И. Струк, С. Г. Живнач // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения : материалы XIV Междунар. ландшафт. конф., г. Воронеж, 17–21 мая 2023 г. : в 2 т. – Воронеж, 2023. – Т. 2. – С. 124–126.
6. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Нормативы качества воды поверхностных водных объектов : ЭкоНП 17.06.01-006-2023. – Утв. постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 15 дек. 2023 г. № 15-Т.
7. Жукинский, В. Н. Методологические основы экологической классификации качества поверхностных вод суши / В. Н. Жукинский, О. П. Оксик // Гидробиологический журнал. – 1983. – Т. 19, № 2. – С. 59–67.
8. Принципы и опыт построения экологической классификации качества поверхностных вод суши / В. Н. Жукинский, О. П. Оксик, Г. Н. Оленик, С. И. Кошелева // Гидробиологический журнал. – 1981. – Т. 17. – С. 38–49.
9. OpenStreetMap. – URL: <https://www.openstreetmap.org> (date of access: 21.02.2025).
10. SRTM. Shuttle Radar Topography Mission. Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). Digital Elevation Data. – URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/> (date of access: 25.09.2022).
11. Лысухо, Н. А. Отходы производства и потребления, их влияние на природную среду / Н. А. Лысухо, Д. М. Ерошина. – Минск : МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2011. – 210 с.
12. Экологические аспекты захоронения твердых коммунальных отходов на полигонах / Д. М. Ерошина [и др.]. – Минск : БелНИЦ «Экология», 2010. – 152 с.
13. Требования к разработке, составлению и оформлению проектов планов управления речными бассейнами : ТКП 17.06-14-2017 (33140). – Утв. постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 26 апр. 2017 г. № 4-Т.
14. План управления бассейном реки Припять. – Утв. решением Гомельского, Брестского, Могилёвского и Минского областных исполнительных комитетов от 27 окт. 2023 г. № 844/739/43-15/1053.
15. План управления бассейном реки Днепр. – Утв. решением Могилёвского, Витебского, Гомельского, Минского областных и Минского городского исполнительных комитетов от 31 дек. 2019 г. № 28-55/710/1086/1043/4236.

References

1. *Landshaftnaya karta Belarusi* [Landscape map of Belarus]. Scale 1 : 500 000. Minsk, 2014. (in Russian)
2. Struk M. I., Zhivnach S. G., Bokaya G. M. *Geoekologicheskaya ocenka prigorodnyh vodohranilishch Minska* [Geoeological assessment of suburban reservoirs of Minsk]. *Prirodopolzovanie = Nature Management*, 2013, iss. 23, pp. 115–124. (in Russian)
3. Struk M. I., Zhivnach S. G., Bokaya G. M. *Geoekologicheskaya ocenka vodosbornogo bassejna vodohranilishcha Ptich'* [Geoeological assessment of the catchment basin of the Ptich reservoir]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 215-letiyu so dnya rozhdeniya I. Domejko, "Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy zapada Vostochno-Evropejskoj platformy: problemy izucheniya i racional'nogo ispol'zovaniya"* [Proc. of the Int. Sci. Conf. of the 215th anniversary of the birth of I. Domejko, "Geology and mineral resources of the western part of the East European platform: problems of study and rational use"]. Minsk, 2017, pp. 329–332. (in Russian)
4. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Biogennoe zagryaznenie vod Petrovichskogo vodohranilishcha* [Biogenic pollution of the Petrovich Reservoir waters]. *Materialy mezhdunar. nauch.-praktich. konferencii, posvyashchennoj 60-letiyu NIL laboratorii ekologii landshaftov fakul'teta geografii i geoinformatiki BGU "Aktual'nye voprosy ustojchivogo prirodnopol'zovaniya: nauchno-metodicheskoe obespechenie i prakticheskoe reshenie"* [Proc. of the int. sci. and pract. conf. of the

- 60th anniversary of the Research Lab of Landscape Ecology of the Faculty of Geography and Geoinformatics of BSU "Current issues of sustainable nature management: scientific and methodological support and practical solutions"]. Minsk, 2022, pp. 438–442. (in Russian)
5. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Landshaftno-ekologicheskaya ocenka vodosbornykh bassejnov prigorodnykh vodohranilishch Minska* [Landscape and Ecological Assessment of Catchment Areas of Suburban Reservoirs of Minsk]. *Materialy XIV Mezhdunarodnoj landshaftnoj konferencii "Teoreticheskie i prikladnye problemy landshaftnoj geografii. VII Mil'kovskie chteniya"* [Proc. of the XIV Int. Landscape Conf. "Theoretical and Applied Problems of Landscape Geography. VII Milkovsky Readings"]. Voronezh, 2023, vol. 2, pp. 124–126. (in Russian)
 6. EkoNiP 17.06.01-006-2023. *Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodnopol'zovanie. Gidrosfera. Normativy kachestva vody poverhnostnykh vodnykh ob'ektov* [Environmental norms and regulations. Environmental Protection and Nature Management. Hydrosphere. Water Quality Standards for Surface Water Bodies]. *Utv. postanovleniem Ministerstva prirodnykh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus ot 15 dekabrya 2023 № 15-T* [Approved by the Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus dated 15 December, 2023, no. 15-T]. (in Russian)
 7. Zhukinskij V. N., Oksiyuk O. P. *Metodologicheskije osnovy ekologicheskoy klassifikacii kachestva poverhnostnykh vod sushi* [Methodological basis for the ecological classification of the quality of terrestrial surface waters]. *Gidrobiologicheskij zhurnal = Hydrobiological Journal*, Kiev, 1983, iss. 2, pp. 59–67. (in Russian)
 8. Zhukinskij V. N., Oksiyuk O. P., Olenik G. N., Kosheleva S. I. *Principy i opyt postroeniya ekologicheskoy klassifikacii kachestva poverhnostnykh vod sushi* [Principles and experience of constructing an ecological classification of the quality of land surface waters]. *Gidrobiologicheskij zhurnal = Hydrobiological Journal*, Kiev, 1981, pp. 38–49. (in Russian)
 9. OpenStreetMap. Available at: <https://www.openstreetmap.org> (accessed 21 February 2025).
 10. SRTM. Shuttle Radar Topography Mission. Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). Digital Elevation Data. Available at: <http://srtm.csi.cgiar.org/> (accessed 25 September 2022).
 11. Lysuho N. A., Eroshina D. M. *Othody proizvodstva i potrebleniya, ih vliyanie na prirodnuyu sredu* [Production and consumption waste, their impact on the environment]. Minsk, 2011, 210 p. (in Russian)
 12. Eroshina D. M., e.a. *Ekologicheskie aspekty zahoroneniya tverdykh kommunal'nykh othodov na poligonah* [Environmental aspects of municipal solid waste disposal at landfills]. Minsk, 2010 p. (in Russian)
 13. TKP 17.06-14-2017 (33140). *Trebovaniya k razrabotke, sostavleniyu i oformleniyu proektov planov upravleniya rechnymi bassejnami* [Technical code of (established) practice. Requirements for the development, compilation, and execution of river basin management plans]. (in Russian)
 14. *Plan upravleniya bassejnom reki Pripyat'* [The Pripyat River Basin Management Plan]. *Utv. resheniem Gomel'skogo, Brestskogo, Mogilevskogo i Minskogo oblastnykh ispolnitel'nykh komitetov ot 27 oktyabrya 2023 goda №844/739/43-15/1053* [Approved by the decision of the Gomel, Brest, Mogilev, and Minsk Regional Executive Committees dated 27 October, 2023]. (in Russian)
 15. *Plan upravleniya bassejnom reki Dnepr* [The Dnieper River Basin Management Plan]. *Utv. resheniem Mogilevskogo, Vitebskogo, Gomel'skogo, Minskogo oblastnykh i Minskogo gorodskogo ispolnitel'nykh komitetov ot 31 dekabrya 2019 goda №28-55/710/1086/1043/4236* [Approved by the decision of the Mogilev, Vitebsk, Gomel, Minsk regional and Minsk city executive committees dated 31 December, 2019]. (in Russian)

Информация об авторах

Струк Михаил Игоревич – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Struk-17@mail.ru

Живнач Светлана Геннадьевна – старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: zhyunach@gmail.com

Бокая Галина Михайловна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, г. Минск, Беларусь). E-mail: geosystem1@rambler.ru

Information about the authors

Mikhail I. Struk – Ph. D. (Geography), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Struk-17@mail.ru

Svetlana G. Zhivnach – 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

Galina M. Bokaya – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220114, Minsk, Belarus). E-mail: geosystem1@rambler.ru

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ ТЕРРИТОРИИ БЕЛОРУССКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Г. П. Бровка, К. А. Агутин, И. Н. Дорожок

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье представлены две прикладные программы для моделирования температурного режима деятельного слоя территории белорусской антарктической станции, одна из которых служит для моделирования температурного режима на горизонтальных поверхностях, а вторая учитывает наклон поверхности и связанные с ним особенности. Расчетная схема программы для горизонтальных поверхностей построена на трехмерной ортогональной сетке. Для программы, учитывающей наклон поверхности, используется трехмерная неортогональная сетка. В численных моделях обоих вариантов программ учитывается зависимость фазового состава воды и теплофизических характеристик верхнего слоя пород от температуры. В программах учтено формирование граничных условий на поверхности территории, обусловленных метеорологическими условиями. В частности, в программе для склоновых поверхностей учтено влияние угла наклона на суточный ход плотности потока солнечной радиации.

Проведено тестирование разработанных программ на эталонных моделях и путем сравнения данных, полученных с помощью мониторинга температурного режима на контрольных площадках, с данными численного моделирования по разработанным программам. Получено удовлетворительное соответствие.

Ключевые слова: прикладная программа, моделирование температурного режима, трехмерная неортогональная сетка, теплофизические характеристики горных пород, фазовые переходы воды в лед, мониторинг температурного режима.

Для цитирования. Бровка Г. П., Агутин К. А., Дорожок И. Н. Прикладные программы для моделирования температурного режима деятельного слоя территории белорусской антарктической станции // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 46–61.

APPLICATION PROGRAMS FOR SIMULATION THE TEMPERATURE REGIME OF THE ACTIVE LAYER OF THE VICINITY OF THE BELARUSIAN ANTARCTIC STATION

G. P. Brovka, K. A. Agutin, I. N. Dorozhok

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

Abstract. This paper introduces two applied tools designed to simulate the thermal regime of the active layer in the vicinity of the Belarusian Antarctic station. The first program focuses on temperature dynamics over horizontal surfaces, while the second incorporates the effects of surface inclination and its specific features. The horizontal-surface model employs a three-dimension orthogonal grid, whereas the slope-oriented model is based on a three-dimensional non-orthogonal mesh. Both approaches account for the temperature-dependent phase composition of water and the thermo-physical properties of the upper soil layer. Boundary conditions are formulated using meteorological inputs, including air temperature, wind speed, and solar radiation. In the slope model, particular attention is given to the influence of surface angle on the diurnal variation of incoming solar flux.

The developed tools were tested against benchmark models and validated through comparison with field monitoring data collected at control sites. The numerical simulations demonstrated satisfactory agreement with the observed temperature profiles, confirming the reliability of the proposed methodology.

Keywords: application program, temperature regime simulation, three-dimensional non-orthogonal grid, thermo-physical characteristics of rocks, phase transitions of water into ice, temperature regime monitoring.

For citation. Brovka G. P., Agutin K. A., Dorozhok I. N. Application programs for simulation the temperature regime of the active layer of the vicinity of the Belarusian Antarctic station. *Nature Management*, 2025, no. 2. pp. 46–61.

Введение. Мониторинг температурного режима верхнего слоя территории, как и всякий другой мониторинг по определению академика Ю. А. Израэля [1], должен включать этап моделирования. С одной стороны, моделирование должно основываться на данных и закономерностях, выявленных в процессе мониторинга, а с другой – оно позволяет более полно реализовать и дополнить мониторинг. Этот общий подход положен в основу методологии проведения исследований по мероприятию А-7 «Провести мониторинг энергомассообмена в деятельном слое Земной поверхности для оценки изменения температурного режима и развития негативных геокриологических процессов в районе расположения белорусской антарктической станции (Гора Вечерняя)» подпрограммы «Развитие деятельности белорусской антарктической станции» Государственной программы «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» на 2021–2025 годы.

Неоднородности рельефа территории белорусской антарктической станции обусловили разработку двух прикладных программ для моделирования температурного режима деятельного слоя территории белорусской антарктической станции. При этом первая прикладная программа в основном построена на ранее отработанных стандартных элементах численных решений задач с фазовыми переходами воды в лед в горных породах методом контрольного объема на трехмерной ортогональной сетке [2, 3]. Эта программа рассчитана на моделирование температурного режима на горизонтальных поверхностях территории и учитывает стандартные метеорологические условия [4]. Вторая прикладная программа учитывает особенности неоднородного рельефа [5] с помощью трехмерной неортогональной сетки, а также влияние угла наклона на суточный ход плотности потока солнечной радиации [6].

Вариант прикладной программы для моделирования температурного режима на горизонтальных поверхностях территории. Расчет трехмерных температурных полей при фазовых переходах вода – лед представляет собой сложную задачу, особенно при локализации фазовых переходов в узком температурном диапазоне. Такие задачи рационально решать в энтальпийной постановке, используя нелинейную зависимость эффективной теплоемкости от температуры, согласованную с фактической зависимостью количества незамерзшей воды во всем рассматриваемом диапазоне:

$$\frac{\partial H(t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(t) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(t) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$H(t) = \int_0^t \left[C_a(t) + \rho_{\text{ск}} \frac{\partial W_{\text{н}}(t)}{\partial t} L \right] dt, \quad (2)$$

где $H(t)$ – объемная энтальпия, Дж/м³; $\lambda(t)$ – коэффициент теплопроводности породы; $T(x, y, z, \tau)$ – температура, °C; x, y, z – декартовы координаты, м; C_a – объемная аддитивная теплоемкость, Дж/(м³·K); $W_{\text{н}}(t)$ – количество незамерзшей воды, кг/кг; $\rho_{\text{ск}}$ – плотность скелета породы, кг/м³; L – теплота фазового перехода воды в лед, Дж/кг; t – время, с.

Для решения применяются численные сеточные методы, основанные на алгоритме пошаговой коррекции температуры с учетом теплового баланса. Этот алгоритм универсален и не имеет принципиальных различий для одномерных и многомерных задач. Его суть заключается в проверке выполнения теплового баланса при переходе точки начала замерзания за временной шаг Δt .

Моделируемый объект – грунтовой массив в форме прямоугольного параллелепипеда размерами 100 м × 100 м × 20 м. Шаг сетки составляет: $\Delta x = 1$ м, $\Delta y = 1$ м, $\Delta z = 0,1$ м. Таким образом, число узлов по осям x и y равно 100, а по оси z – 200.

Граничные условия задаются следующим образом:

- верхняя граница – радиационный и конвективный тепловые потоки, рассчитываемые по метеоданным (температура воздуха, скорость ветра, суммарная солнечная радиация, зависящая от географической широты и высоты Солнца над горизонтом);
- боковые границы – условие теплоизоляции.

В качестве исходных характеристик грунта используются общая плотность, влагосодержание, температура начала замерзания, удельная теплоемкость скелета, коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого состояния. В процессе расчета дополнительно определяются количество незамерзшей воды, эффективные теплоемкости талого и мерзлого грунта, а также теплота фазового перехода вода – лед. Теплофизические параметры (теплоемкость, коэффициент теплопроводности) корректируются в зависимости от температуры и содержания незамерзшей воды.

Задача сводится к энтальпийной постановке задачи Стефана: определяется теплота фазового перехода на фронте промерзания и постоянной эффективной теплоемкости в зоне ниже температуры начала замерзания. Особенность алгоритма заключается в обратном вычислении температуры по изменяющемуся значению энтальпии в области ниже точки замерзания.

Теплофизические характеристики грунтов: ρ – общая плотность, кг/м³; W – влагосодержание, кг/кг; $T_{н.з.}$ – температура начала замерзания, °C; $c_{ск}$ – удельная теплоемкость скелета грунта, Дж/кг; λ_T, λ_M – коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта, Вт/(м К).

Расчет эффективной теплоемкости и энтальпии. Для песчано-гравелистых пород, какими является большинство рыхлых пород в районе расположения белорусской антарктической станции, основные фазовые переходы воды в лед происходят в диапазоне температуры до –1 °C. Поэтому расчет удельной эффективной теплоемкости проводится по нижеприведенным формулам.

Количество незамерзшей воды при –1 °C и –30 °C

$$W_n(T) = a_1(-T)^n + a_2, \quad (3)$$

где W_n – количество незамерзшей воды, кг/кг; a_1, a_2, n – эмпирические коэффициенты.

Плотность скелета

$$\rho_{ск} = \frac{\rho}{1+W}. \quad (4)$$

Удельная теплоемкость:

а) талого грунта:

$$c_{эф.т.} = c_w W + c_{ск}, \quad (5)$$

где c_w – удельная теплоемкость воды, Дж/кг;

б) мерзлого грунта:

$$c_{эф.м.} = \frac{(W_n(-30) - W_n(-1))L - c_l(W_n(-30) - W)(-30 - T_{н.з.})}{-30 - T_{н.з.}} + \frac{(c_w W_n(-30) + c_{ск})(-30 - T_{н.з.})}{-30 - T_{н.з.}}, \quad (6)$$

где c_l – удельная теплоемкость льда, Дж/кг; L – удельная теплота фазового перехода вода – лед, Дж/кг.

Теплота фазового перехода вода – лед, Дж/кг:

$$Q_{ф.} = (W - W_n(-1))L\rho_{ск}. \quad (7)$$

Расчет начальных значений энтальпии:

$$H_{i,j,k} = \begin{cases} (C_{эф.м.}\rho_{ск}(T_{i,j,k} - T_{н.з.}) - Q_{ф.})\Delta V, & \text{если } T_{i,j,k} < T_{н.з.} \\ -Q_{ф.}\Delta V, & \text{если } T_{i,j,k} = T_{н.з.} \\ (C_{эф.т.}\rho_{ск}(T_{i,j,k} - T_{н.з.}))\Delta V, & \text{если } T_{i,j,k} > T_{н.з.} \end{cases}, \quad (8)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_T, & \text{если } H \geq 0 \\ \lambda_M, & \text{если } H < 0 \end{cases}. \quad (9)$$

Расчет радиационного потока проводится согласно [5].

Склонение Солнца

$$S = \frac{23,5 \sin(D - 81,5) \pi}{183}, \quad (10)$$

где D – номер дня с начала года.

Высота Солнца над горизонтом

$$\sin h = \sin \varphi \cdot \sin S + \cos \varphi \cdot \cos S \cdot \cos \left(\frac{2\pi\tau}{\Pi} \right), \quad (11)$$

где φ – географическая широта местности наблюдения; τ – время, отсчитываемое от полудня; Π – период вращения Земли (24 ч).

Суммарная солнечная радиация

$$I = I^* (0,944 - 0,063\tau_L) \sin h, \quad (12)$$

где I^* – солнечная постоянная ($I^* = 1,26 \text{ кВт/м}^2$); τ_L – параметр мутности атмосферы ($\tau_L = 2,4$); h – высота солнца над горизонтом, м.

Встречное излучение атмосферы

$$B_a = \sigma T_n^4 (a_1 + b_1 \sqrt{P_2}), \quad (13)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \text{ K}^4)$); T_n – абсолютная температура воздуха на высоте 2 м, К (из погодных данных); $a_1 = 0,526$; $b_1 = 0,065$; P_2 – парциальное давление водяного пара в миллибарах на высоте 2 м.

Излучение поверхности почвы

$$B_0 = \sigma T_n^4, \quad (14)$$

где T_n – абсолютная температура поверхности.

Радиационный поток [5]:

$$q_p = (1-r)I + d(B_a - B_0), \quad (15)$$

где r – альбедо поверхности; I – суммарная солнечная радиация (прямая и рассеянная), Вт/м²; d – поглощательная способность поверхности.

Расчет конвективного теплового потока.

Коэффициент конвективного теплообмена:

а) в ночное время:

$$\alpha_k = 4,0 + 2,0 V_n; \quad (16)$$

б) в дневное время:

$$\alpha_k = 8,5 + 2,0 V_n, \quad (17)$$

где V_n – скорость ветра, м/с (из погодных данных).

Конвективный тепловой поток

$$q_k = -\alpha_k T_n - T_n, \quad (18)$$

где α_k – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К); T_n – температура поверхности почвы, °С; T_n – температура воздуха на высоте 2 м, °С.

Общий внешний поток

$$q_{out} = q_p + q_k. \quad (19)$$

Расчет внутренних потоков:

$$q_{1,i,j,k} = \frac{dy \cdot dz}{dx} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) \frac{2\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k}}, \quad (21)$$

$$q_{2,i,j,k} = \frac{dy \cdot dz}{dx} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) \frac{2\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k}}, \quad (22)$$

$$q_{3,i,j,k} = \frac{dy \cdot dz}{dx} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) \frac{2\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k}}, \quad (20)$$

$$q_{4,i,j,k} = \frac{dy \cdot dz}{dx} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) \frac{2\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k}}, \quad (23)$$

$$q_{5,i,j,k} = \frac{dy \cdot dz}{dx} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) \frac{2\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k}}, \quad (24)$$

$$q_{6,i,j,k} = \frac{dy \cdot dz}{dx} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) \frac{2\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k}}. \quad (25)$$

Изменение энтальпии

$$\Delta H_{i,j,k} = (q_{1,i,j,k} + q_{2,i,j,k} + q_{3,i,j,k} + q_{4,i,j,k} + q_{5,i,j,k} + q_{6,i,j,k}) \Delta \tau. \quad (26)$$

Значения энтальпии на новом временном слое

$$\Delta H_{i,j,k}^{t+1} = H_{i,j,k}^t + \Delta H_{i,j,k}^t. \quad (27)$$

Значения температуры на новом временном слое

$$T_{i,j,k}^{t+1} = \begin{cases} \left(\frac{H_{i,j,k}^{t+1}}{c_{\text{эф.т.}} \rho_{\text{ск}} \Delta V} + T_{\text{н.з.}} \right), & \text{если } H_{i,j,k}^{t+1} \geq 0 \\ T_{\text{н.з.}}, & \text{если } -Q_{\phi} \Delta V \leq H_{i,j,k}^{t+1} < 0 \\ \left(\frac{H_{i,j,k}^{t+1} + Q_{\phi} \Delta V}{c_{\text{эф.м.}} \rho_{\text{ск}} \Delta V} + T_{\text{н.з.}} \right), & \text{если } H_{i,j,k}^{t+1} \geq -Q_{\phi} \Delta V \end{cases}. \quad (28)$$

Переход на следующий временной слой

$$\tau^{j+1} = \tau^j + \Delta \tau. \quad (29)$$

Разработанный модуль (рис. 1) предназначен для моделирования температурного поля горизонтального грунтового массива в районе белорусской антарктической станции «Гора Вечерняя». В его основу положен численный сеточный метод с алгоритмом коррекции пошагового изменения температуры на основании теплового баланса.

Вводная часть программы включает два блока: данные о характеристиках горных пород; метеоданные – альбедо, температуру воздуха и скорость ветра.

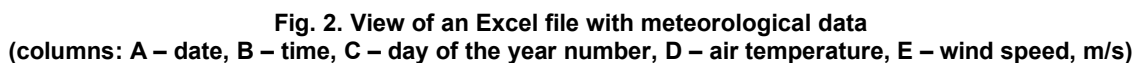
Метеоданные вводятся из Excel-файла (.xls) заданного формата (рис. 2).

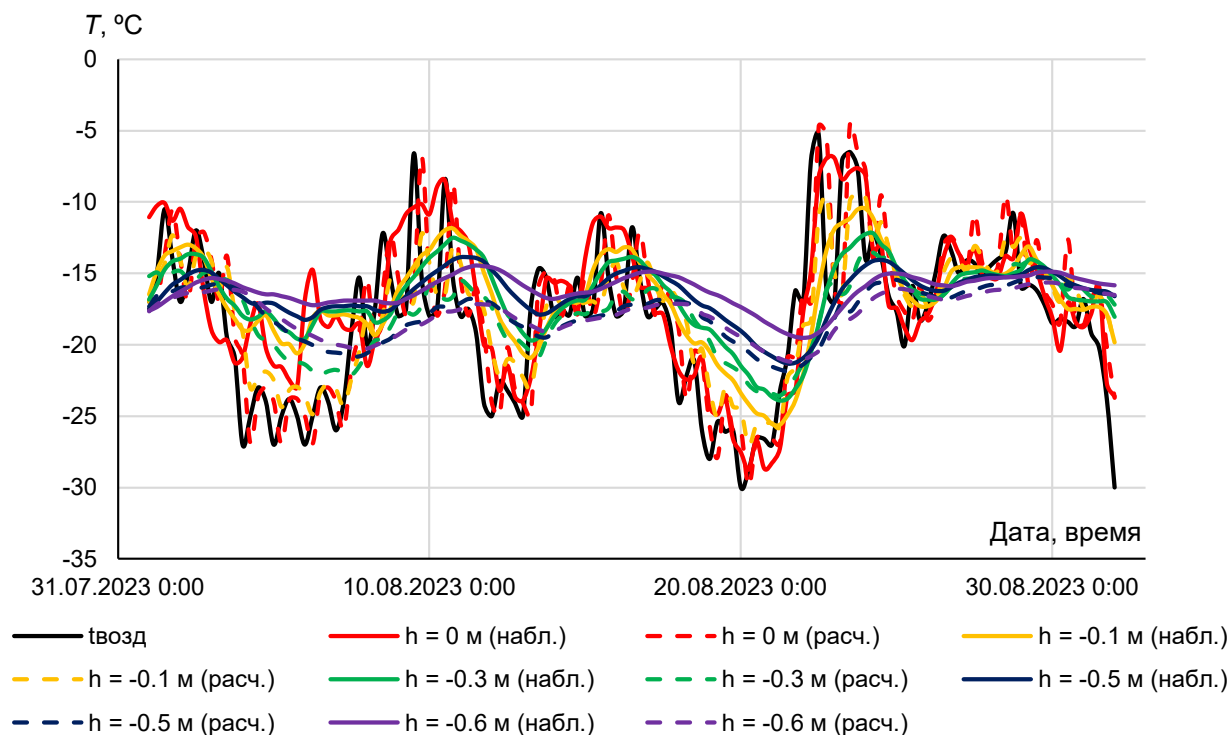
Результатом расчета является трехмерный массив значений температуры, выводимый в таблицу. По умолчанию отображается вертикальный срез, позволяющий анализировать распределение температуры по глубине.

С помощью программы был проведен ряд расчетов на различные периоды времени, которые можно сравнить с данными натурных наблюдений (рис. 3, 4). Из приведенных результатов видна довольно близкая сходимость результатов расчета и наблюдения.

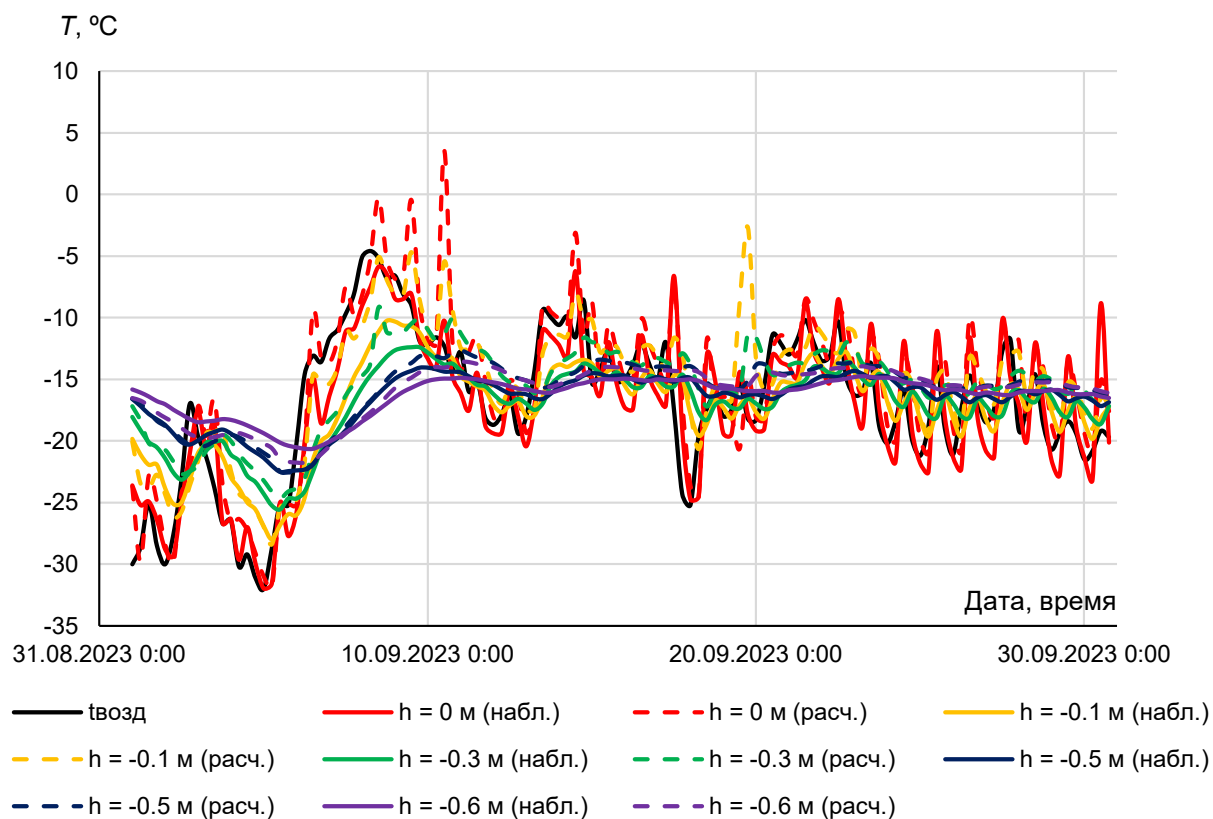


Рис. 2. Вид Excel-файла с метеоданными
(столбцы: А – дата, В – время, С – номер дня года, D – температура воздуха, Е – скорость ветра, м/с)





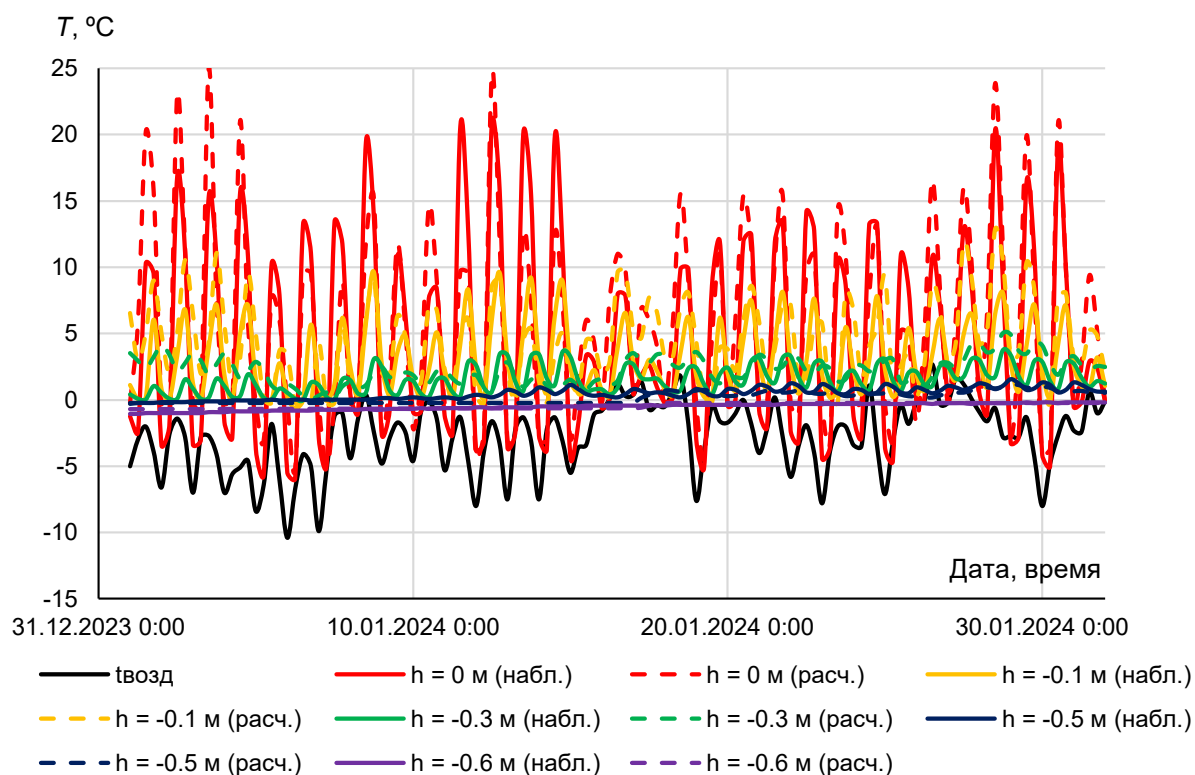
а (a)



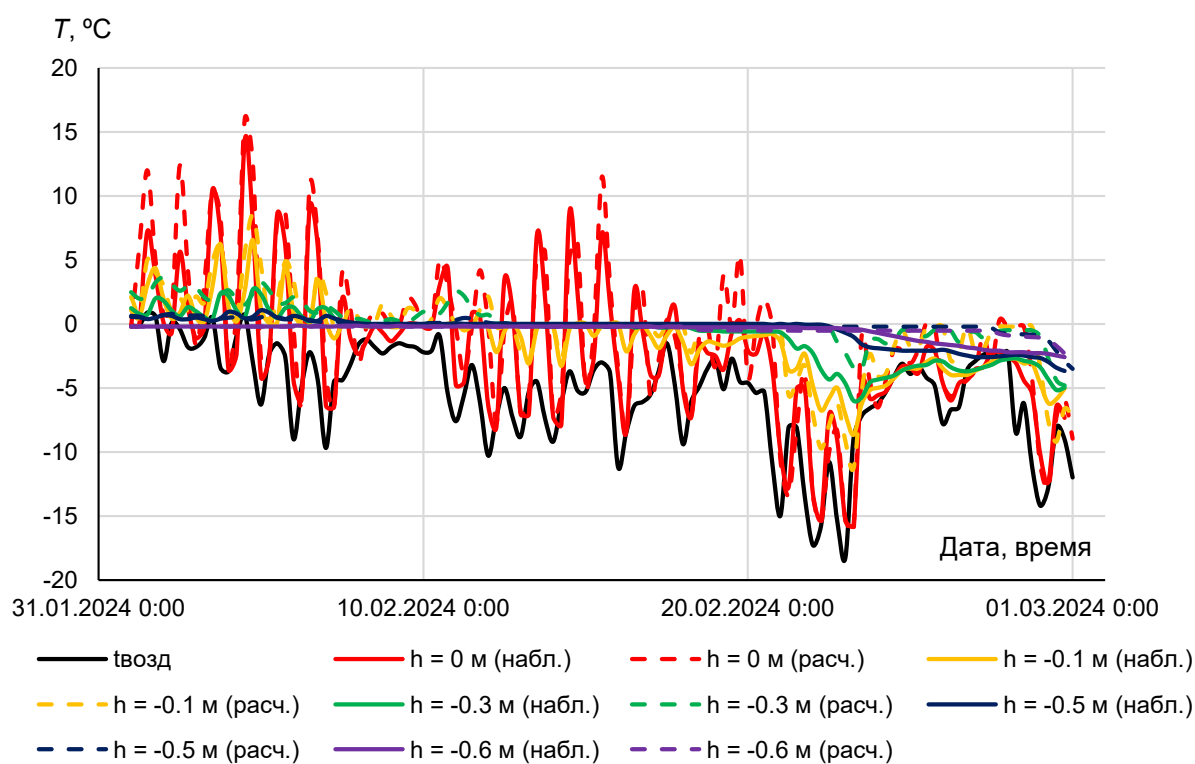
б (b)

Рис. 3. Сравнение натуральных и расчетных данных по температуре в августе (а) и сентябре (б) 2023 г.

Fig. 3. Comparison of actual and calculated temperature data for August (a) and September (b) 2023



а (а)



б (б)

Рис. 4. Сравнение натурных и расчетных данных по температуре в январе (а) и феврале (б) 2024 г.

Fig. 4. Comparison of actual and calculated temperature data for January (a) and February (b) 2024

Особенности расчета температурного режима наклонных подстилающих поверхностей. Территория, прилегающая к белорусской антарктической станции, имеет перепад высот в направлении север – юг – 225 м, а в направлении запад – восток – 200 м. В глобальном масштабе количество солнечного излучения, полученного поверхностью, контролируется геометрией Земли, атмосферной проницаемостью и относительным размещением Солнца. В местном масштабе излучение изменяется из-за наклона поверхности, перспективы и возвышения. Выше была приведена методика расчета энергии солнечного излучения для горизонтальной поверхности. Для наклонной поверхности она требует доработки.

Анализ данных наблюдений за температурным режимом и развитием геокриологических процессов в компонентах природно-территориального комплекса белорусской антарктической станции показывает, что основным фактором, влияющим на указанные процессы, является динамика температурного поля в верхних слоях ледопородного покрова. При этом динамика температурного поля определяется в основном кондуктивным переносом тепла в ледопородном покрове и радиационно-конвективным теплообменом на поверхности ледопородного покрова. Следует обратить внимание, на тот факт, что в ясную погоду в весенне-летний период амплитуда колебаний температуры на поверхности ледопородного покрова достигает более 30 °С с нагревом поверхностного слоя до +25 °С. Это обуславливает существенные структурные преобразования в горных породах верхнего слоя, что приводит к ряду негативных геокриологических явлений, таких как криогенное выветривание, морозобойное растрескивание на склоне скальных пород, полигонально-трещинные образования, курумообразование, денудационно-карстовый палеорельеф с признаками ветровой эрозии и палеокарстовыми пустотами, солифлюкция на склонах, медальоны пучения на морене.

Для расчета располагаемого количества солнечной энергии, поступающего на наклонную поверхность, необходимо знать углы падения солнечных лучей на наклонную и горизонтальную поверхности в данном месте. На количество солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность, оказывают влияние ориентация поверхности, характеризующаяся азимутом поверхности, и угол наклона освещаемой поверхности к горизонту [6].

Среднемесячное среднее дневное значение плотности солнечного излучения, поступающего на наклонную поверхность,

$$E_n = RE, \quad (30)$$

где R – отношение значений плотности солнечного излучения, поступающего на наклонную и горизонтальную поверхности; E – среднемесячное среднее дневное значение плотности солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность, Вт/м².

Коэффициент пересчета количества солнечной энергии с горизонтальной поверхности на наклонную поверхность равен сумме трех составляющих, соответствующих прямому, рассеянному и отраженному солнечному излучению:

$$R = \left(1 - \frac{E_p}{E}\right) R_n + \frac{E_p}{E} \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (31)$$

где $\frac{E_p}{E}$ – среднемесячная доля рассеянного солнечного излучения; R_n – среднемесячный коэффициент пересчета прямого солнечного излучения с горизонтальной поверхности на наклонную поверхность, градус; β – угол наклона освещаемой поверхности к горизонту, градус; ρ – альbedo поверхности Земли и окружающих тел.

Альbedo снега сильно различается: от 0,9 для свежеснежного до 0,4 для таящего снега и до 0,2 для грязного снега. В районе Антарктиды альbedo снега в среднем немногим больше 0,8.

Среднемесячный коэффициент пересчета прямого солнечного излучения с горизонтальной поверхности на наклонную поверхность

$$R_n = [\cos(\beta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\beta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\beta) \cdot \cos(\psi_n) \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \sin(\beta) \cdot \cos(\psi_n) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) - \sin(\beta) \cdot \cos(\psi_n) \cdot \frac{\sin(\delta)}{\cos(\varphi)} + \sin(\beta) \cdot \sin(\psi_n) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega)], \quad (32)$$

где β – угол наклона склона к горизонту, рад (изменяется от 0 до $\pi/2$); φ – широта места, рад; δ – склонение солнца, рад; ω – часовой угол Солнца в данный момент времени, отсчитываемый от момента истинного полудня; ψ_n – азимут проекции нормали к склону на горизонтальную плоскость, отсчитываемую от плоскости меридиана (если вертикальная поверхность обращена к югу, то $\psi_n = 0$, если на восток или запад – $\psi_n = \pi/2$, если на север – $\psi_n = \pi$).

Склонение

$$\delta = 23,5 \sin \left(\frac{360}{365} \cdot (284 + D) \right), \quad (33)$$

где D – номер дня с начала года.

Часовой угол переводит местное солнечное время в количество градусов. В полдень часовой угол равен нулю. Земля поворачивается на 15° за 1 ч. Утром угол солнца отрицательный, а после полудня положительный:

$$\omega = 15^\circ (LST - 12), \quad (34)$$

где LST – местное солнечное время;

$$LST = LT + \frac{TC}{60}, \quad (35)$$

где LT – местное время; TC – временной поправочный коэффициент, мин.

Временной поправочный коэффициент

$$TC = 4(LSTM - Longitude) + EoT, \quad (36)$$

где $LSTM$ – местный стандартный временной меридиан; $Longitude$ – долгота; EoT – уравнение времени суток, мин.

Уравнение времени суток:

а) мин:

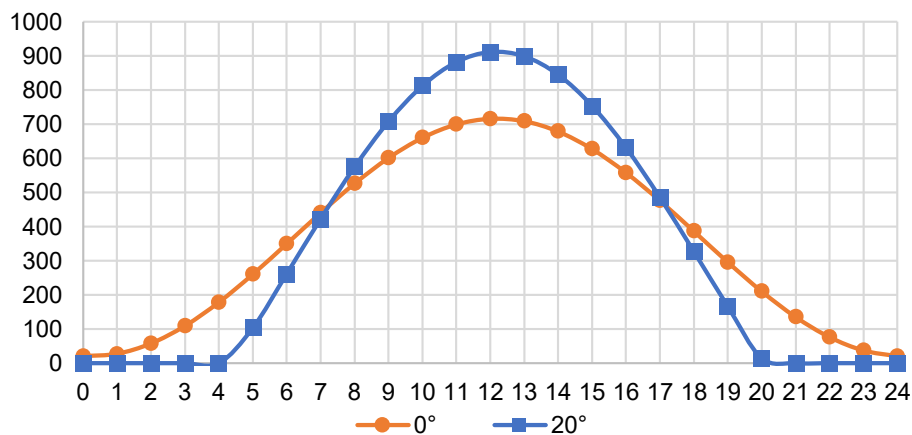
$$EoT = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B); \quad (37)$$

б) град:

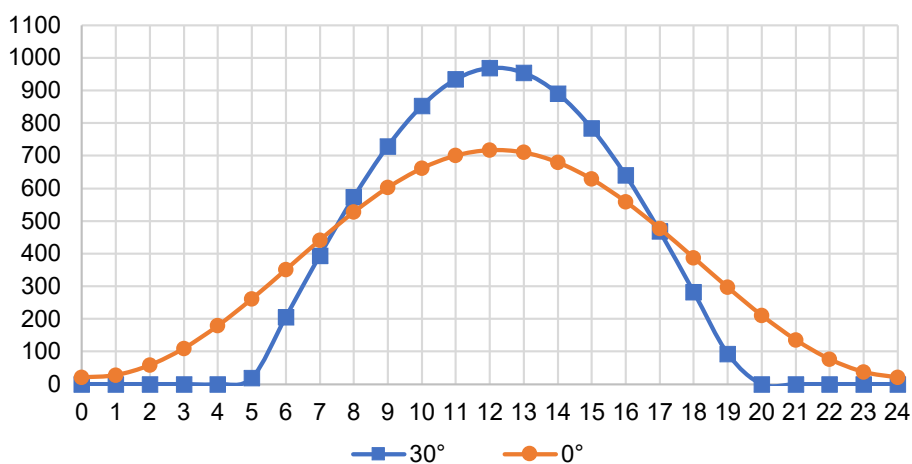
$$B = \frac{360}{365} (D - 81). \quad (38)$$

Используя вышеизложенную методику расчета, выполнены расчеты изменения суммарной солнечной радиации в течение суток в районе белорусской антарктической станции на начало января при наклоне подстилающей поверхности от 10° до 60° в направлении юг – север.

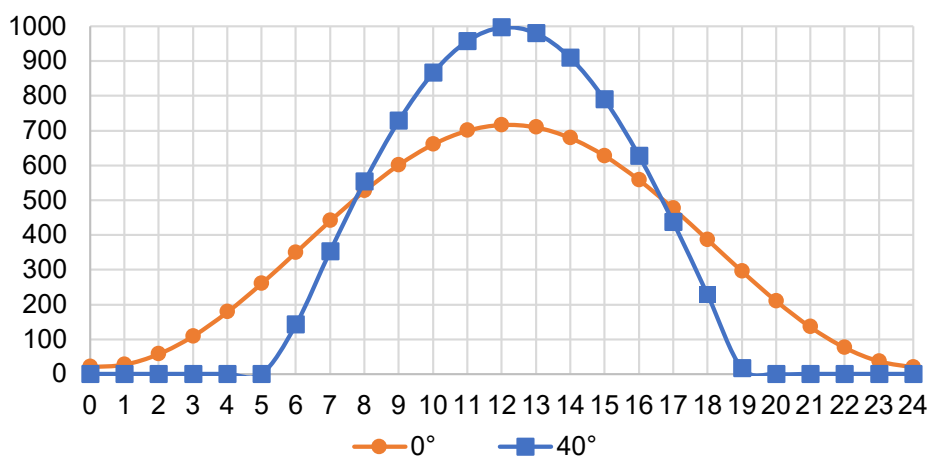
Из приведенных на рис. 5 данных видно, что в начале и конце суток на наклонных площадках суммарный поток солнечной радиации имеет нулевое значение. В полуденное время суммарный поток солнечной радиации начинает возрастать по сравнению с соответствующими условиями на горизонтальных площадках по мере увеличения угла наклона от 10° до 50° , а затем постепенно снижается. Максимальное увеличение потока солнечной радиации по сравнению с горизонтальной площадкой может достигать 40 %, что обуславливает соответствующее увеличение максимальной температуры в полуденное время на объектах рельефа, имеющих наклонные площадки, ориентированные в направлении север – юг.



a (a)



б (b)



в (c)

Рис. 5. Изменение суммарной солнечной радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в течение суток в районе белорусской антарктической станции на начало января при наклоне подстилающей поверхности на 20° (а), 30° (б), 40° (в) в направлении юг – север

Fig. 5. Change in total solar radiation during the day in the area of the Belarusian Antarctic station at the beginning of January with an underlying surface tilt of 20° (a), 30° (b), 40° (c) in the south-north direction

Модуль прикладной программы для численного расчета процессов энергомассообмена в приземном слое атмосферы и подстилающей поверхности применительно к склоновым поверхностям рельефа. При численном расчете процессов переноса тепла в природно-территориальных комплексах с неоднородным рельефом с различной проницаемостью возникают проблемы с построением ортогональных сеток, на которые должна быть разбита область моделирования. Для адаптации сетки и расчетной схемы к рельефу местности разработана расчетная схема на неортогональных сетках.

Принцип построения таких расчетных схем заключается в следующем. Проекция области моделирования на горизонтальную плоскость разбивается двумерной прямоугольной сеткой с шагом от 10 до 100 м в зависимости от неоднородности рельефа местности. Шаги в направлениях осей горизонтальных координат X и Y могут иметь различные значения. Вертикальная координата Z разбивается более мелким и неравномерным шагом, адаптированным к геологическому строению верхнего слоя почвы, подстилающих грунтов и водоносных горизонтов. Направление оси Z и порядок нумерации узлов по ней может быть направленным от поверхности в нижние горизонты или наоборот – от нижней границы моделируемого слоя к поверхности. Это не имеет принципиального значения для качественных и количественных характеристик расчетной схемы. Необходимо только учитывать соответствующим образом знаки потенциалов и геометрических параметров сетки. Основное требование при разбивке вертикальной координаты заключается в строго одинаковом количестве узлов в вертикальном направлении и соответствии одинаковому номеру узла вертикальной координаты дневной поверхности для всей области моделирования.

В результате такой процедуры вся область моделирования разбивается на блоки, имеющие форму прямоугольников в проекции на горизонтальную плоскость. Проекции этих блоков на вертикальные плоскости, разбивающие область в горизонтальном плане, представляют собой трапеции, и сетка в этих плоскостях является неортогональной. Это, с одной стороны, несколько усложняет расчетную схему, а с другой – позволяет выделить и привязать слой одинакового строения к определенному диапазону номеров узлов в вертикальном направлении. Главное – выделить особый поверхностный слой, соответствующий рельефу.

С учетом неортогональности сетки в проекциях на вертикальные плоскости и неравномерности ее по координате Z в формулы для расчета потоков тепла вводятся корректирующие коэффициенты. При этом потоки на границе блоков нумеруются в определенной последовательности. Потоки в вертикальных направлениях обозначаются q_{T_1} и q_{T_2} , по оси X – q_{T_3} и q_{T_4} , по оси Y – q_{T_5} и q_{T_6} . Меньший номер соответствует потоку со стороны узла с меньшим номером. Далее для однозначного определения вклада потоков в баланс рассчитываемого блока потоки, направленные от соседних узлов к этому узлу, считаются положительными независимо от направления соответствующей оси координат. Для этого во всех формулах, по которым рассчитываются потоки, фигурирует разность потенциала переноса соседнего узла и потенциала рассчитываемого узла.

Расчетная схема с учетом оговоренных условий:

$$q_{T_1} = \lambda_1 \frac{T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k} + \delta T_1}{\Delta z_{j,k}} \Delta x \Delta y f_{1,i,j,k}, \quad (39)$$

$$q_{T_2} = \lambda_2 \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k} + \delta T_2}{\Delta z_{j,k}} \Delta x \Delta y f_{2,i,j,k}, \quad (40)$$

$$q_{T_3} = \lambda_3 \frac{T_{i,j-1,k} - T_{i,j,k}}{\Delta x} \Delta y 0,5(\Delta z_{j-1,k} + \Delta z_{j,k}) f_{3,i,j,k}, \quad (41)$$

$$q_{T_4} = \lambda_4 \frac{T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k}}{\Delta x} \Delta y 0,5(\Delta z_{j+1,k} + \Delta z_{j,k}) f_{4,i,j,k}, \quad (42)$$

$$q_{T_5} = \lambda_5 \frac{T_{i,j,k-1} - T_{i,j,k}}{\Delta y} \Delta x 0,5(\Delta z_{j,k-1} + \Delta z_{j,k}) f_{5,i,j,k}, \quad (43)$$

$$q_{T_6} = \lambda_6 \frac{T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}}{\Delta y} \Delta x 0,5(\Delta z_{j,k+1} + \Delta z_{j,k}) f_{6,i,j,k}. \quad (44)$$

Более детальные элементы расчетной схемы представлены в работе [4].

Изменение энтальпии за шаг по времени в узлах трехмерной сетки выполняется по формуле (26):

$$\Delta H_{i,j,k} = (q_{1,i,j,k} + q_{2,i,j,k} + q_{3,i,j,k} + q_{4,i,j,k} + q_{5,i,j,k} + q_{6,i,j,k}) \Delta \tau.$$

После цикла расчета изменения энтальпии во всех узлах моделируемой области в соответствии с явной расчетной схемой выполняется цикл обновления энтальпии по формуле (27):

$$\Delta H_{i,j,k}^{t+1} = H_{i,j,k}^t + \Delta H_{i,j,k}^t.$$

Значения температуры на новом временном слое определяются по формуле (28):

$$T_{i,j,k}^{t+1} = \begin{cases} \left(\frac{H_{i,j,k}^{t+1}}{c_{эфт} \rho_{ск} \Delta V} + T_{нз} \right), & \text{если } H_{i,j,k}^{t+1} \geq 0 \\ T_{нз}, & \text{если } -Q_{\phi} \Delta V \leq H_{i,j,k}^{t+1} < 0 \\ \left(\frac{H_{i,j,k}^{t+1} + Q_{\phi} \Delta V}{c_{эфм} \rho_{ск} \Delta V} + T_{нз} \right), & \text{если } H_{i,j,k}^{t+1} \leq -Q_{\phi} \Delta V \end{cases}.$$

На основе вышеприведенной схемы разработана программа, позволяющая рассчитывать и прогнозировать распределение температурных полей в породах с учетом неоднородностей рельефа и поступления солнечной радиации на наклонные поверхности и графической визуализацией полученных результатов. Моделирование осуществлено в следующей последовательности.

На объекте «Гора Вечерняя» (рис. 6) выделена область моделирования, которая в проекции на горизонтальную плоскость представляет собой прямоугольник размером 3,2 км² × 2,2 км². В плоскости вертикальных разрезов выделен один пласт мощностью 50 м. Область моделирования разбита трехмерной сеткой с шагом 1 м. Проекция области на горизонтальную плоскость разбита прямоугольной сеткой 126 × 92 узлов с шагом 25 м. В плоскости вертикальных разрезов пласт разбит на 50 слоев. При такой разбивке шаг по вертикальной координате в каждом пласте изменяется в горизонтальном направлении, и в плоскости вертикальных разрезов сетка является неортогональной. Для численного моделирования на такой сетке использована расчетная схема (39 × 47). Для проверки работы программы в нее загружены данные по лучисто-конвективному обмену с учетом наклона поверхности [2] и характеристикам теплопереноса.

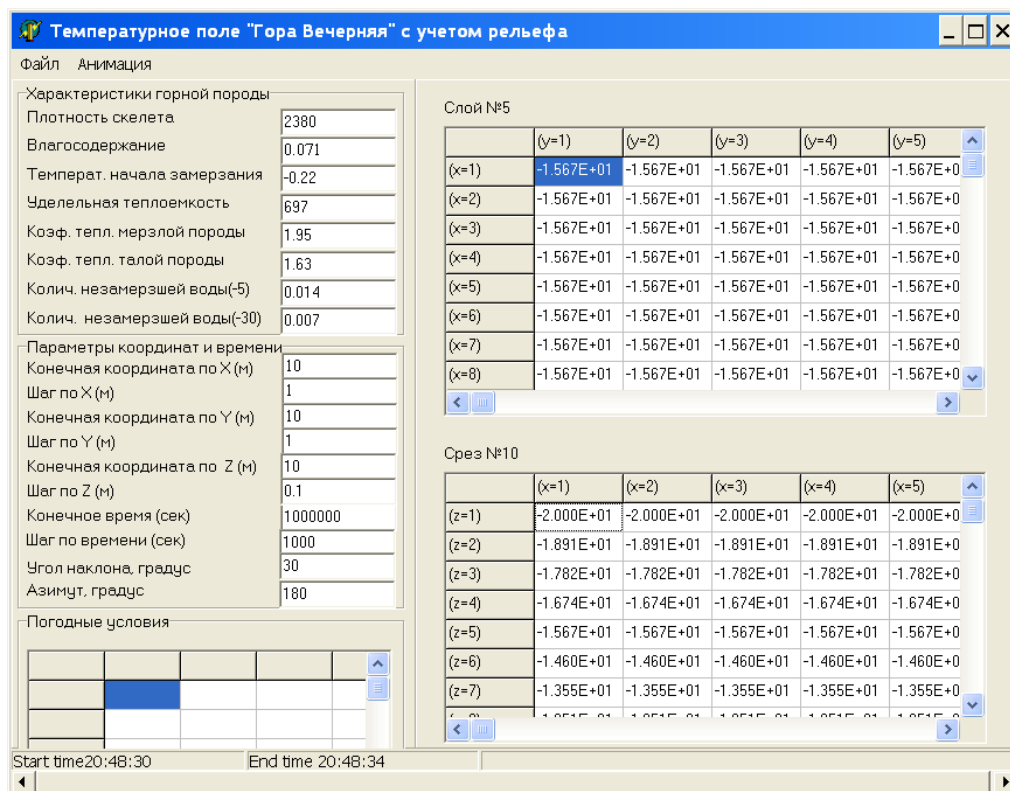


Рис. 6. Главное окно программы

Fig. 6. The main program window

Тестирование программного модуля для расчета температурного режима ледопородного слоя применительно к склоновым поверхностям рельефа. Для сравнения численной модели, используемой в расчетной программе для склоновых поверхностей рельефа, проведено сопоставление данных, полученных с помощью модуля программы, соответствующей склоновым поверхностям, и эталонной программой на различные периоды времени в режиме замораживания. При этом смоделирован слой горной породы, наклоненный к горизонтальной поверхности с $\tan \alpha$ угла, равным значению 0,5, т. е. на 5 м расстояния в горизонтальном направлении поверхность рельефа поднимается на 2,5 м. В соответствии с этим создана неортогональная сетка, на которой проведено моделирование замораживания слоя горной породы с начальной температурой $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на охлаждаемой поверхности. Полученные результаты сопоставлены с результатами, полученными с помощью эталонной программы, в которой координата, соответствующая основному направлению изменения температуры, направлена перпендикулярно поверхности.

На рис. 7 представлены расположения изотерм после 30 суток промораживания на тестируемой и эталонной программе, из данных которого следует, что наблюдается удовлетворительное соответствие тестируемой и эталонной программ.

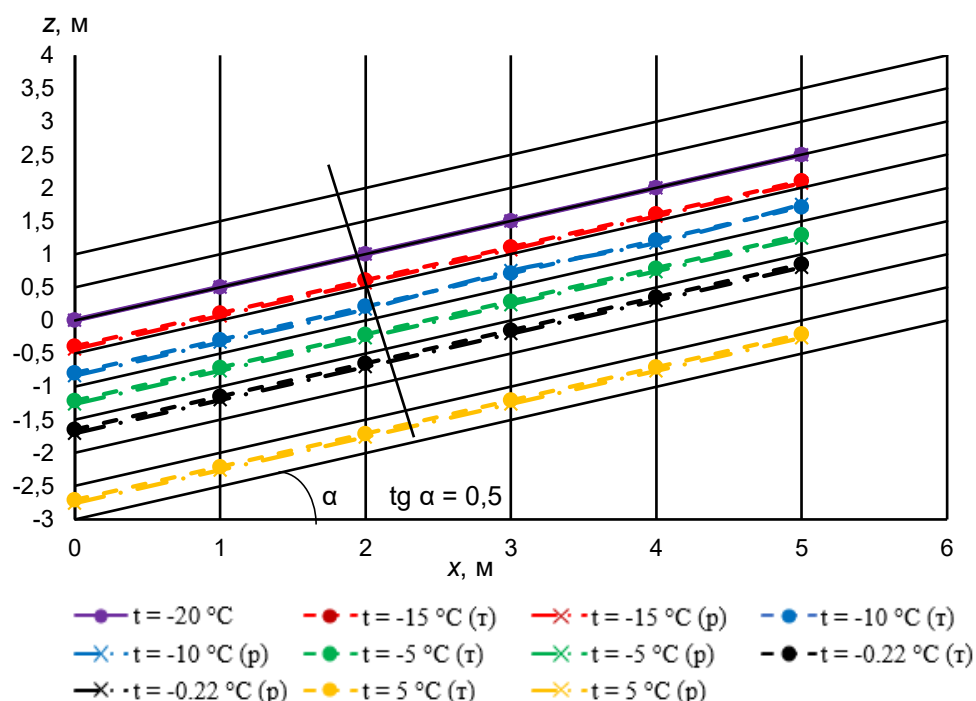


Рис. 7. Расположение изотерм после 30 суток промораживания на тестируемой и эталонной программах

Fig. 7. Location of isotherms after 30 days of freezing on the test and reference programs

Таким образом, можно сделать заключение, что неортогональная сетка позволяет получать адекватные результаты при моделировании температурного режима на склоновых участках территории.

Для оценки влияния наклона поверхности территории на максимальную температуру нагрева этой поверхности выполнены расчеты суточных изменений температуры на горизонтальной и наклонной поверхностях с углом наклона в направлении север – юг в 40° в теплый период года (начало января). Результаты этого расчета представлены на рис. 8, из которых видно, что пик температуры на наклонной поверхности на $10\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем соответствующий пик на горизонтальной поверхности. Эти результаты коррелируют с данными, полученными участником 17-й антарктической экспедиции Н. В. Козловским, выполняющим задание вышеуказанного мероприятия А-7. Исследователем было выявлено, что в отдельных случаях температура поверхности скальных пород может достигать 35°C . Это может являться одной из основных причин деструкции скальных пород.

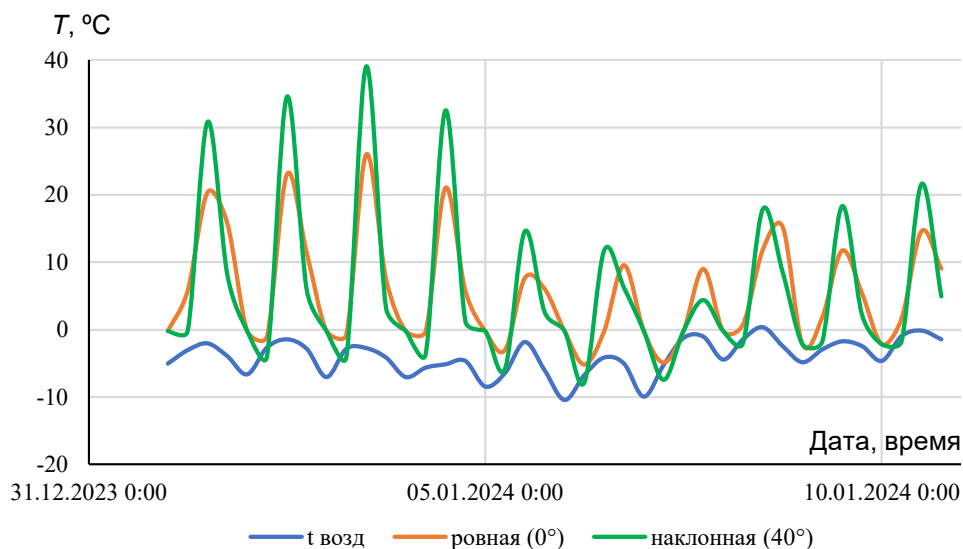


Рис. 8. Сравнение расчетной температуры на ровной и наклонной (40°) поверхностях в январе 2024 г.

Fig. 8. Comparison of estimated temperatures on flat and inclined (40°) surfaces in January 2024

Заключение. С учетом неоднородности рельефа территории белорусской антарктической станции разработаны две прикладные программы для моделирования температурного режима горизонтальных и склоновых участков территории. Эти программы протестированы на эталонных моделях и путем сравнения данных, полученных с помощью мониторинга температурного режима на контрольных площадках, с данными численного моделирования по разработанным программам. Результаты тестирования показали адекватность численных расчетов результатам фактических наблюдений.

Разработанные программы позволяют рассчитать динамику температурного поля в деятельном слое территории с различным рельефом и выявить закономерности влияния теплофизических характеристик горных пород, метеорологических условий и рельефа территории на формирование температурного режима.

В частности, установлено, что в период полярного дня в полуденное время суммарный поток солнечной радиации возрастает по сравнению с соответствующими условиями на горизонтальных площадках по мере увеличения угла наклона от 10° до 50°, а затем начинает снижаться по мере увеличения угла наклона. Максимальное увеличение потока солнечной радиации по сравнению с горизонтальной площадкой может достигать 40 %. Это будет обуславливать соответствующее увеличение максимальной температуры в полуденное время на объектах рельефа, имеющих наклонные площадки, ориентированные в направлении север – юг.

С помощью разработанных программных средств и приборного мониторинга температурного режима с помощью термометрических кос, оснащенных логгерами, можно выполнять комбинированный мониторинг территории белорусской антарктической станции. В таком случае расчеты с помощью разработанных программных средств будут дополнять данные разреженной сети приборного мониторинга температурного режима территории. В свою очередь, приборный мониторинг будет обеспечивать контроль адекватности моделирования температурного режима в периоды экстремальных вариаций метеорологических условий и тренда климатических условий.

Список использованных источников

1. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – М. : Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.
2. Расчеты температурного режима и энергетических затрат при формировании ледопородных ограждений для проходки шахтных стволов / Г. П. Бровка, К. А. Агутин, М. В. Мучко, Н. А. Липницкий // Инженерная геология. – 2021. – Т. 16, № 1. – С. 74–84.

3. Бровка, Г. П. Математические модели и методы экспериментального исследования процессов тепломассопереноса и пучения при промерзании грунтов / Г. П. Бровка, К. А. Агутин, А. А. Мурашко // Инженерная геология. – 2021. – Т. 16, № 4. – С. 62–71.
4. Бровка, Г. П. Взаимосвязанные процессы тепло- и массопереноса в природных дисперсных средах / Г. П. Бровка. – Минск : Бел. наука, 2011. – 363 с.
5. Матвеев, Л. Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли / Л. Т. Матвеев. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 295 с.
6. Duffie J. A. Solar engineering of thermal process / J. A. Duffie, W. A. Beckman. – 1st ed. – N. Y. : John Wiley and Sons, 1980. – 469 p.

References

1. Israel Y. A. *Ekologiya i kontrol sostoyaniya prirodnoy sredy* [Ecology and control of the state of the natural environment]. Moscow, Hydrometeoizdat Publ., 1984, 560 p. (in Russian)
2. Brovka G. P., Agutin K. A., Muchko M. V., Lipnitsky N. A. *Raschioty temperaturnogo rezhima i energeticheskikh zatrat pri formirovani ledoporodnyh ograzhdeniy dla prohodki shahtnyh stvolov* [Calculations of temperature conditions and energy costs during the formation of ice walls for sinking mine shafts]. *Inzhenernaya geologiya* = Engineering geology, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 74–84. (in Russian)
3. Brovka G. P., Agutin K. A., Murashko A. A. *Matematicheskie modeli i metody experimentalnogo issledovaniya processov teplomassoperenosa i pucheniya pri promerzani gruntov* [Mathematical models and methods of experimental study of heat and mass transfer processes and heaving during soil freezing]. *Inzhenernaya geologiya* = Engineering geology, 2021, vol 16, no. 4, pp. 62–71. (in Russian)
4. Brovka G. P. *Vzaimosvyazannye processy teplo- i massoperenosa v prirodnih dispersnyh sredah* [Interrelated processes of heat and mass transfer in natural dispersed media] Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2011, 363 p. (in Russian)
5. Matveev L. T. *Teoriya obschey cirkulyaciy atmosfery i klimata Zemli* [Theory of General Circulation of the Atmosphere and Climate of the Earth] Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1991, 295 p. (in Russian)
6. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar engineering of thermal process. 1st ed. New York, John Wiley and Sons, 1980, 469 p.

Информация об авторах

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

Агутин Кирилл Алексеевич – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kirill.agutin@gmail.com

Дорожок Инга Николаевна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: ingadorozhok@list.ru

Information about the authors

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., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: brovka_gp@tut.by

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

Inga N. Dorozhok – Researcher, Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus, (10, F. Skoryna Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: ingadorozhok@list.ru

УДК 91:004(043.3)

Поступила в редакцию 23.10.2025

Received 23.10.2025

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМНЫХ ФУНКЦИЙ ГОРОДСКОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ (НА ПРИМЕРЕ г. ПИНСКА)

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 культурного и промышленного центра Полесья – города Пинска – выполнена оценка структуры, состояния и эффективности функционирования растительного покрова в составе различных типов городских геотехнических систем (ГТС) путем совмещенного анализа данных дистанционного зондирования Земли и дифференцированного ГИС-проекта городской территории. Растительный покров различных функциональных зон города оценен по снимкам спутника 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 структуры и состояния растительного покрова на тестовых полигонах в основных типах городских экосистем г. Пинска определены связи вегетационных индексов с депонированием углерода городскими экосистемами. Полученные связи позволили создать дифференцированную картосхему депонирования CO₂ растительностью в выделах ГТС г. Пинска и рассчитать, что ежегодно депонируется около 13,7 тыс. т CO₂. Дифференцированная оценка температуры подстилающей поверхности (LST) в различных типах ГТС г. Пинска проведена по снимкам спутника Landsat 8 и данным ГИС-проекта. Установлены обратные связи между средними на момент съемки значениями LST, с одной стороны, и LAI, а также степенью озелененности выделов ГТС Пинска, с другой. Соответствующие им значения коэффициента детерминации (R^2) являются невысокими (0,27 и 0,35), что свидетельствует о влиянии на регистрируемую спутником температуру поверхности не только насаждений, но и других факторов городской среды (например: эмиссий техногенного тепла в промышленных ГТС, полива насаждений в жилой усадебной застройке, подтопления заболоченных территорий в пойме). Причинами неустранимого для данной работы их влияния являются как различие эффективного пространственного разрешения снимков LST и LAI, так и высокая расчлененность озелененных территорий в застроенной части г. Пинска и мелкоконтурность выделов ГТС, что в совокупности привело к участию в анализе пикселей LST со смешанными поверхностями.

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

Для цитирования. Кравчук Л. А., Яновский А. А., Баженова Н. М., Живнач С. Г., Быкова Н. К., Книга П. В. Исследования экосистемных функций городской растительности с использованием геоинформационных систем и спутниковой съемки (на примере г. Пинска) // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 62–74.

STUDY OF ECOSYSTEM FUNCTIONS OF URBAN VEGETATION USING GEOINFORMATION SYSTEMS AND SATELLITE IMAGING (ON THE EXAMPLE OF PINSK)

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 structure, condition and efficiency of green areas within various types of urban geotechnical systems (GTS) of Pinsk, a major cultural and industrial center in Polesie, were assessed through a combined analysis of Earth remote sensing data and a differentiated GIS project of the urban area. The vegetation cover of the urban areas of various functional zones was assessed using Sentinel-2 satellite images with the calculation of the normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI), canopy chlorophyll content (CCC) and the greening degree (%). Relationships between vegetation indices and carbon deposition by urban ecosystems were determined on the basis of subsatellite studies of the structure and condition of vegetation at test sites in the main types of urban ecosystems of Pinsk. The

relationships were used to create a differentiated map of CO₂ deposition by vegetation within various GTS of Pinsk and make the assessment that approximately 13,7·10² tons of CO₂ are being deposited annually. A differentiated assessment of the land surface temperature (LST) in various types of Pinsk GTS was carried out using Landsat 8 satellite images and GIS project data. The negative relationships have been found between the averaged for the time of survey LST values, on the one hand, and the LAI and the greening degree values in GTS of Pinsk, on the other. The corresponding values of the determination coefficient (R^2) are low (0.27 and 0.35), indicating that the surface temperature recorded by the satellite is influenced not only by vegetation, but also by other urban environmental factors (for example, technogenic heat emissions from industrial GTS, irrigation of plantings in residential estates, flooding of wetlands in the floodplain). The reasons for their influence, which cannot be eliminated in this work, are the significant difference in the effective spatial resolution of LST and LAI images, the high fragmentation of green areas in the built-up part of Pinsk and the small-contour nature of its GTS sections, which together led to LST pixels corresponding to mixed surfaces.

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

For citation. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M., Zhivnach S. G., Bykova N. K., Kniga P. V. Study of ecosystem functions of urban vegetation using geoinformation system and satellite imaging (on the example of Pinsk). *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 62–74.

Введение. Интенсивная застройка городских территорий актуализирует вопросы оценки эффективности функционирования растительного покрова в городах и оптимизации городской «зеленой инфраструктуры». Данные оценки важны для градостроительного планирования при формировании экологически обоснованной системы озелененных территорий, а также при планировании мероприятий по адаптации к изменению климата и благоустройству городских насаждений.

В исследованиях авторы придерживаются концепции города как интегральной социо-геотехнической системы, состоящей из различных типов территориально распределенных взаимодействующих через систему связей и управление геотехнических систем (ГТС) – жилых многоквартирных, жилых усадебных, общественных, производственных, коммунально-складских, транспортных, saniрующих, ландшафтно-рекреационных, сельскохозяйственных и др. Разделение их обусловлено как степенью и спецификой техногенного преобразования природных ландшафтов, так и интенсивностью воздействия на компоненты природной среды.

Для характеристики весьма динамичных городских экосистем, наряду с применением традиционных дорогостоящих методов полевых исследований растительного покрова, в настоящее время активно используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Опыт их использования для получения качественных и количественных характеристик структуры природных ландшафтов [1], естественного растительного покрова [2, 3] и городских территорий [4–6 и др.] демонстрирует востребованность данного направления исследований.

Цель работы – апробировать методологию оценки структуры, состояния и эффективности выполнения растительностью основных экосистемных функций в составе городских ГТС различных типов при совмещенном использовании данных ДЗЗ и дифференцированного в разрезе выделов ГТС ГИС-проекта городской территории.

Методика и материалы исследований. Для оценки структуры и состояния насаждений на территории г. Пинска применили совмещенную обработку данных ДЗЗ и ГИС-проекта городской территории, дифференцированного в разрезе выделов ГТС различного функционального назначения.

Исследования включали:

- подготовку дифференцированного в разрезе типов и видов ГТС ГИС-проекта городской территории;
- анализ имеющихся в свободном доступе материалов ДЗЗ, подбор снимков с наиболее высоким пространственным разрешением и наиболее приближенным к проведению подспутниковых натурных исследований временем съемки;
- проведение исследований на тестовых полигонах в составе городских ГТС различных типов для оценки структуры, состояния и продуктивности растительного покрова;
- обработку спутниковых снимков с расчетом индексов, характеризующих растительный покров и температуру подстилающей поверхности городской территории;
- корегистрацию снимков и ГИС-проекта;
- анализ данных ДЗЗ в разрезе структурно-планировочных выделов городских ГТС различных типов и видов;
- расчеты основных экосистемных функций (депонирование углерода, климаторегулирующие) с использованием дифференцированных на уровне выделов данных ДЗЗ и зависимостей, установленных при подспутниковых исследованиях;
- построение дифференцированных картосхем для оценки показателей, характеризующих основные экосистемные функции растительного покрова (депонирование углерода, климаторегулирующие) в составе различных ГТС городской территории.

В процессе исследований для территории г. Пинска подготовили ГИС-проект, в котором с использованием данных публичной кадастровой карты (<https://map.nca.by>), Геопортала ЗИС УП Белгипрозем (gismap.by), картографической подосновы, ведомственных сведений идентифицировали и оконтурили выделы ГТС различных типов: производственные (П) и коммунально-складские (КС), жилой многоквартирной (ЖМ), жилой усадебной (ЖУ), общественной (О) различных видов специальной (СП) застройки, а также санирующие (САН), нарушенные (НАР), сельскохозяйственные (СХ) и ландшафтно-рекреационные (ЛР) территории. При дифференциации выделов ГТС застроенных территорий на виды использовали следующие обозначения: жилая усадебная высокоплотная и смешанная – ЖУв, ЖУсм, жилая многоквартирная высоко-, средне-, низкоплотная и смешанная – ЖМв, ЖМс, ЖМн, ЖМсм соответственно. В составе общественных типов ГТС выделяли следующие виды: административно-деловые (Оад), лечебно-оздоровительные (Оло), научно-образовательные (Оно), торгово-бытовые (Отб), культурно-просветительские (Окп), культовые (Окульт), спортивные (Оспорт), смешанные (Осм). В составе производственных и коммунально-складских выделяли теплоэнергетические (ПЭ), промышленные (ПП) транспортные (ПКтранс), смешанные (ПКсм), складские (Кскл), гаражи (Кгар), инженерные объекты и сооружения (Кинж). Ландшафтно-рекреационные территории дифференцировали на следующие виды: леса и лесопарки (ЛП), парки (П), малые ландшафтные формы (МЛФ – скверы, бульвары, озелененные участки общественных центров), а также спонтанная растительность на незастроенных участках города – резервных озелененных территориях (РОТ). Они представлены как участками природного комплекса (болота, луга – РОТприр), так и защитными насаждениями в санитарных разрывах, санитарно-защитных зонах предприятий, коммунальных объектов и коммуникаций (РОТз), древесно-кустарниковой растительности на незастроенных участках (РОТдкр). В целом на территории г. Пинска в ГИС-проекте идентифицировано близко к тысяче выделов 11 типов и 33 видов ГТС.

Обработка данных ДЗЗ включала расчет значений нормализованного разностного индекса растительности (англ. Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) [7], индекса листовой поверхности (англ. Leaf Area Index, LAI, m^2/m^2) и содержания в растительном пологом хлорофилла (англ. Canopy Chlorophyll Content, CCC, mg/cm^2). Ее осуществили по снимкам спутника серии Sentinel-2. Использовали снимки спутников S2A и S2B уровня обработки 1C (орторектифицированные снимки, представленные значениями коэффициента отражения на уровне апертуры радиометра с субпиксельной точностью совмещения спектральных каналов) с датой съемки для территории г. Пинска 16 июля 2024 г. Атмосферную коррекцию выполнили с помощью программы обработки Sen2Cor [8], которая основана на алгоритме «Атмосферная/топографическая коррекция спутниковых снимков» (ATCOR) [9] и использовании модели переноса излучения LIBRADTRAN [10]. Для повышения точности классификации Sen2Cor водных объектов, городской застройки, открытой поверхности Земли использовали дополнительный пакет данных ESACCI-LC для Sen2Cor [11].

При расчете NDVI, LAI, CCC использовали каналы с пространственным разрешением 10 и 20 м, последние приведены к разрешению 10 м согласно [12]. Расчет NDVI выполнили с пространственным разрешением 10 м. Из расчетов исключили пиксели с искаженными или вышедшими на насыщение значениями, а также облака и их тени.

Озелененность (%) каждого выдела ГТС рассчитали как процентное отношение числа пикселей со значениями NDVI, соответствующих растительности, к общему числу пикселей, центры которых находятся в данном выделе.

Значения LAI и CCC рассчитали с помощью модуля «биофизический обработчик» L2B программы Sentinel-2 Toolbox [13]. Расчет LAI и CCC биофизическим процессором проводится с применением нейронных сетей с использованием моделей переноса излучения [14].

Температуру подстилающей поверхности (англ. Land Surface Temperature – LST) определяли по снимкам спутников серии Landsat. Выбранный снимок LST для г. Пинска получен прибором TIRS спутника Landsat 8 (дата и время съемки: 16.07.2024, 12 ч 07 мин местного времени). Данный прибор регистрирует яркостную температуру в двух тепловых диапазонах при пространственном разрешении 100 м. Последующее приведение оператором Landsat данных каналов к разрешению 30 м путем передискретизации методом «кубическая свертка» не приводит к увеличению их эффективного пространственного разрешения. Для оценки показателей LST в разрезе основных типов и видов ГТС в городах выполнили коррекцию геопривязки снимков Landsat и извлекли значения кинетической температуры поверхности для пикселей, соответствующих выделам ГТС в ГИС-проекте г. Пинска.

Результаты и их обсуждение. Анализ дифференцированного в разрезе выделов ГТС ГИС-проекта территории Пинска в пределах городской черты (рис. 1) продемонстрировал преобладание застроенных территорий, доля которых оценивается близко к 54 %. Из них около 22 % составляют ГТС жилой усадебной застройки, что выше площади ГТС жилой многоквартирной застройки (9 %). Доля участков под промышленными и коммунально-складскими ГТС оценивается в 14 %, а под общественными и специализированными ГТС – 7 и 1 % соответственно. Санирующие ГТС, к которым

отнесены очистные сооружения, на момент исследования занимали 1 %, а транспортные ГТС (с учетом инфраструктуры – стоянок, развязок, АЗС и др.) – близко к 9 % территории г. Пинска (без учета проездов в составе застройки).

Водные объекты занимают 2 % и представлены участками рек Пины и Припяти с притоками и затоками, а также мелиоративными каналами и небольшими прудами, входящими в городскую черту.

Озелененные территории (без учета водных объектов) вне кварталов застройки занимают около 32 % городских земель. В г. Пинске высоко участие относительно малоизмененных природных комплексов, которые представлены заболоченными массивами на южной малозастроенной части города в пойме рек Припяти и Пины (14 % от площади городских земель), лесами (2 %), а также древесно-кустарниковой и луговой растительностью на резервных территориях (10 %). Участие благоустроенных озелененных рекреационных территорий общего пользования – парков, скверов, бульваров, озелененных территорий общественных центров – в составе городской территории несущественно. Парки занимают только 0,2 % площади городской территории и представлены городским парком им. Днепроградской флотилии, а также городским детским парком, на момент исследований находящемся на стадии благоустройства и практически не имеющем рекреационной инфраструктуры. Скверы, бульвары и озелененные территории общественных центров – небольшие по площади, расположены преимущественно в центральной части города и занимают около 1 % городской территории. На берегу рек Пины и Припяти функционируют благоустроенные зоны кратковременного отдыха у воды (пляжи) (0,2 %). Доля защитных насаждений (РОТз), расположенных в санитарных разрывах между промзонами и коммуникациями, вдоль магистралей оценивается близко к 5 %.

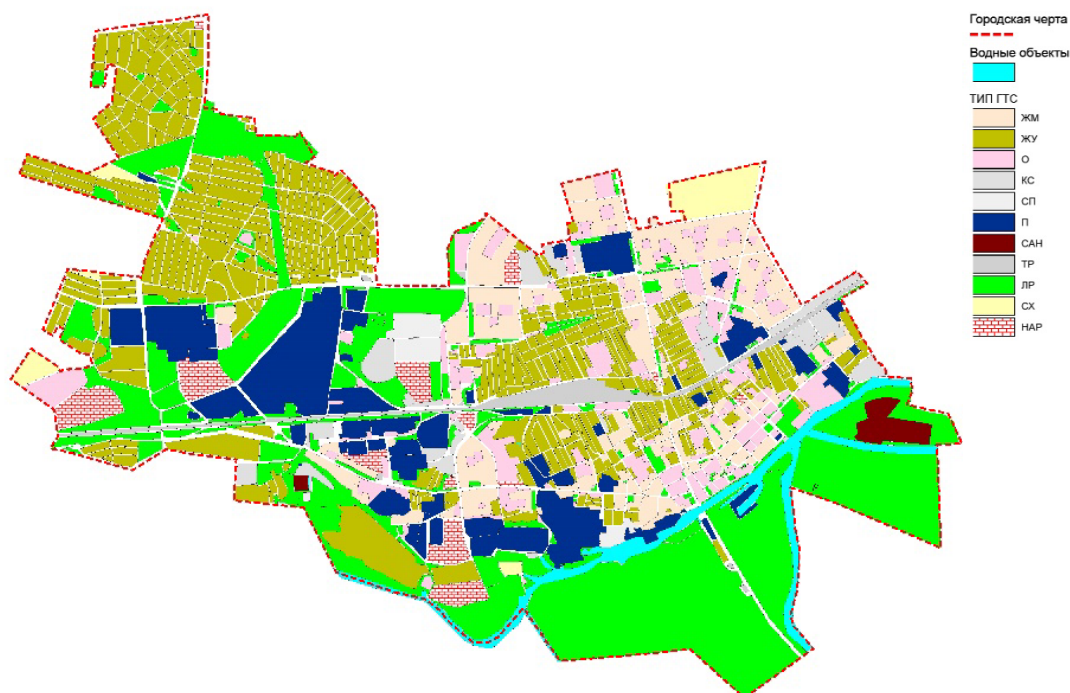


Рис. 1. Структура ГТС г. Пинска (в разрезе типов): ЖМ – жилые многоквартирные; ЖУ – жилые усадебные; КС – коммунально-складские; ЛР – ландшафтно-рекреационные; НАР – нарушенные (в том числе незавершенное строительство); О – общественные; П – производственные; САН – saniрующие; СП – специальные; СХ – сельскохозяйственные; ТР – транспортные

Fig. 1. Structure of the Pinsk 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

Результаты совмещенной обработки данных ДЗЗ и ГИС-проекта для г. Пинска, дифференцированного в разрезе выделов ГТС, позволили построить картосхемы распределения NDVI, LAI и CCC в разрезе выделов ГТС различного типа и вида. Средние значения NDVI растительного покрова в структурно-планировочных выделах различных ГТС городской территории Пинска (рис. 2), демонстрируют наиболее высокие средние показатели NDVI (0,60–0,62) на южной окраине города в долине рек Пины и Припяти. Растительность здесь представлена болотными экосистемами с участием деревьев и кустарников (ивы, осина, ольха и др.). В городских сосновых лесах данные показатели являются

более низкими (0,42–0,46). Сравнительно высокими средними значениями NDVI (0,48–0,51) характеризуется древесно-кустарниковая растительность резервных озелененных территорий, расположенных вблизи промзон, а также насаждения в жилой усадебной застройке (рис. 2).

Нормируемым показателем качества городской среды является озелененность городской территории и различных ее функциональных типов. Эти показатели в Беларуси регламентируются экологическими и строительными нормами [15, 16]. Дифференцированная оценка озелененности в разрезе выделов ГТС позволила выявить участки городской территории с низкими показателями (рис. 3).



Рис. 2. Распределения средних значений NDVI (Avg_NDVI) в ГТС г. Пинска

Fig. 2. Distribution NDVI (Avg_NDVI) of vegetation cover in GTS units of Pinsk

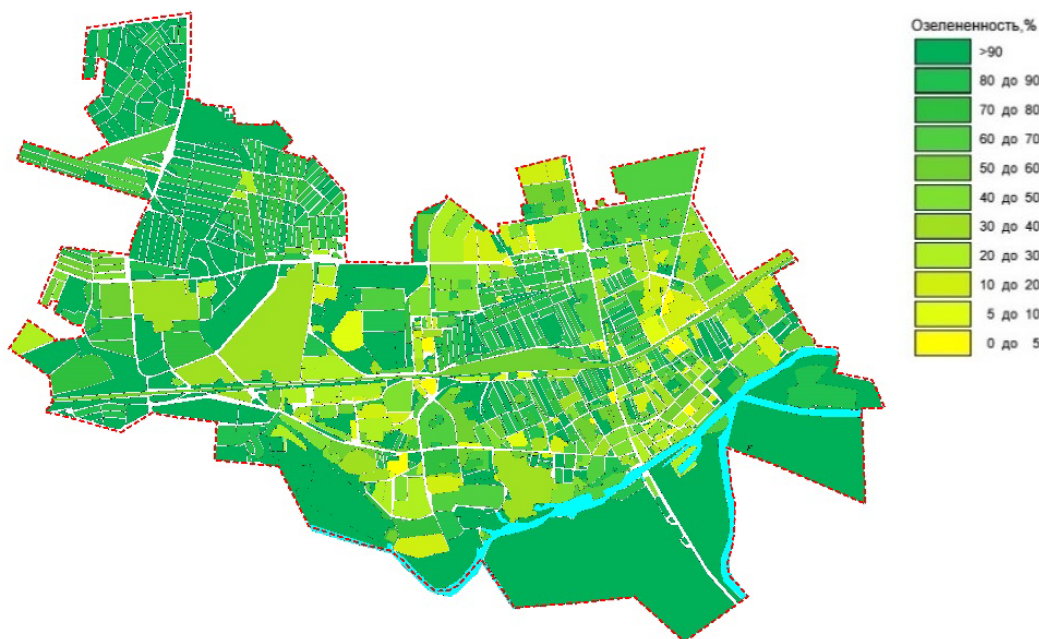


Рис. 3. Схема озелененности (%) выделов ГТС на территории г. Пинска

Fig. 3. Scheme of greenery degree (%) of GTS units in Pinsk

Низкие значения озелененности, как видно из рис. 3, отмечаются в г. Пинске на участках ряда производственных и коммунальных ГТС (промобъекты, гаражные массивы, складские территории), а также в кварталах новой жилой многоквартирной и общественной (преимущественно торгово-бытовой) застройки, на участках незавершенного строительства.

Ряд средозащитных и средоформирующих функций растительности (ассимиляционная, пылезадерживающая, климаторегулирующая, стокорегулирующая и др.) определяются значением индекса листовой поверхности – LAI, который коррелирует с фотосинтезирующей биомассой и приростом согласно [17, с. 175], и зависит от типа растительности и ее состояния. Следует отметить, что LAI существенно варьирует в связи с сезонной динамикой развития растений, дефолиацией при их ослаблении. В городах косьба и деградация газонов, обрезка и удаление деревьев приводят к снижению значений LAI. Низкие значения LAI свидетельствуют о незначительном участии древесной и кустарниковой растительности, разреженном травянистом покрове, ослаблении растений. Однако высокие значения LAI в городах могут регистрироваться при интенсивном развитии сорной растительности, в том числе инвазивных видов.

Распределение средних значений LAI в выделах ГТС г. Пинска приведены на рис. 4. Низкие средние показатели LAI в выделах ГТС г. Пинска идентифицируются в основном для участков новой жилой многоквартирной и усадебной застройки, на сельскохозяйственных землях, а также для общественных ГТС (преимущественно торгово-бытовой застройки) и промышленно-коммунальных объектов.

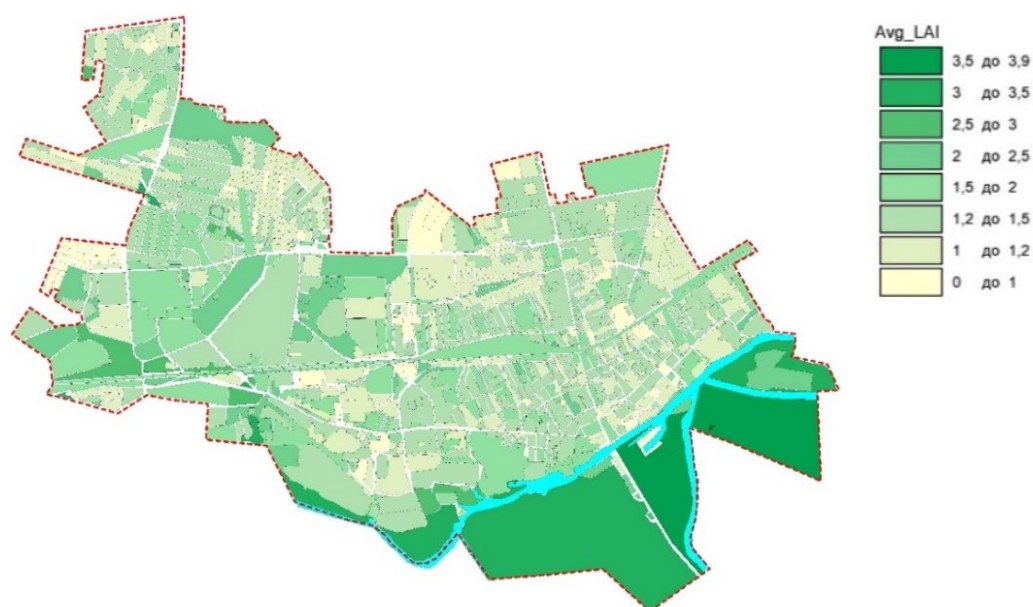


Рис. 4. Схема распределения средних значений индекса листовой поверхности (Avg_LAI) в выделах ГТС на территории г. Пинска

Fig. 4. Scheme of average LAI values in GTS units of Pinsk

Значения NDVI, LAI и CCC (разделенное на 100 для удобства отражения на единой диаграмме) в разрезе различных видов ГТС в г. Пинске приведены на рис. 5, из которого видно, что средние показатели вегетационных индексов в застроенной части г. Пинска по видам ГТС варьируют незначительно, наибольшие различия наблюдаются в максимальных показателях, а это указывает, прежде всего, на высокое участие в составе растительного покрова древесно-кустарниковой растительности. Наиболее существенные отличия от насаждений в других ГТС отмечаются у насаждений в составе ЛР территорий, где заболоченные территории на южной незастроенной части Пинска (РОТприр) и защитные насаждения (РОТз) демонстрируют более высокие значения всех индексов по сравнению, например, с лесами, парками и МЛФ.

Для оценки эффективности выполнения растительностью города экосистемных функций (например, депонирования углерода) использовали зависимости, установленные при спутниковых исследованиях на тестовых полигонах (ТП). Исследования проводили в период, наиболее приближенный к времени спутниковой съемки (15–18.07.2024), на полигонах точечного и площадного типов. В качестве ТП точечного типа выбирали наименее фрагментированные участки растительного покрова (в лесах, парках, в составе резервных озелененных территорий, насаждений в ГТС жилой многоквартирной и общественной застройки). Площадные полигоны выделяли в ГТС с высокой фрагментацией

насаждений техногенными зданиями, сооружениями и покрытиями. Оценка растительного покрова на ТП точечного типа заключалась в выявлении структуры и состояния древесного и кустарникового яруса, их морфометрических обмеров. Для травянистого покрова определяли проективное покрытие доминирующих видов, высоту травостоя.

С использованием таблиц и моделей хода роста и биологической продуктивности [18, 19] определяли продуктивность и удельные показатели депонирования углерода растительностью на ТП. Для этого проанализировали связь между значениями NDVI, LAI и CCC и депонированием углерода. Для 27 точечных ТП в г. Пинске наиболее сильные связи депонирования углерода получены для LAI. Регрессионные уравнения связи депонирования углерода со средними значениями LAI, полученные на тестовых полигонах в г. Пинске, отражены на рис. 6.

Использование регрессионных уравнений связи расчетных показателей депонирования углерода (C , т/га в год) со средними показателями LAI на тестовых полигонах г. Пинска (см. рис. 6) позволило провести оценку удельных показателей депонирования углерода растительностью в выделах ГТС Пинска по средним значениям LAI данных выделов (см. рис. 3). Полученные результаты приведены на рис. 7 в пересчете на CO_2 .

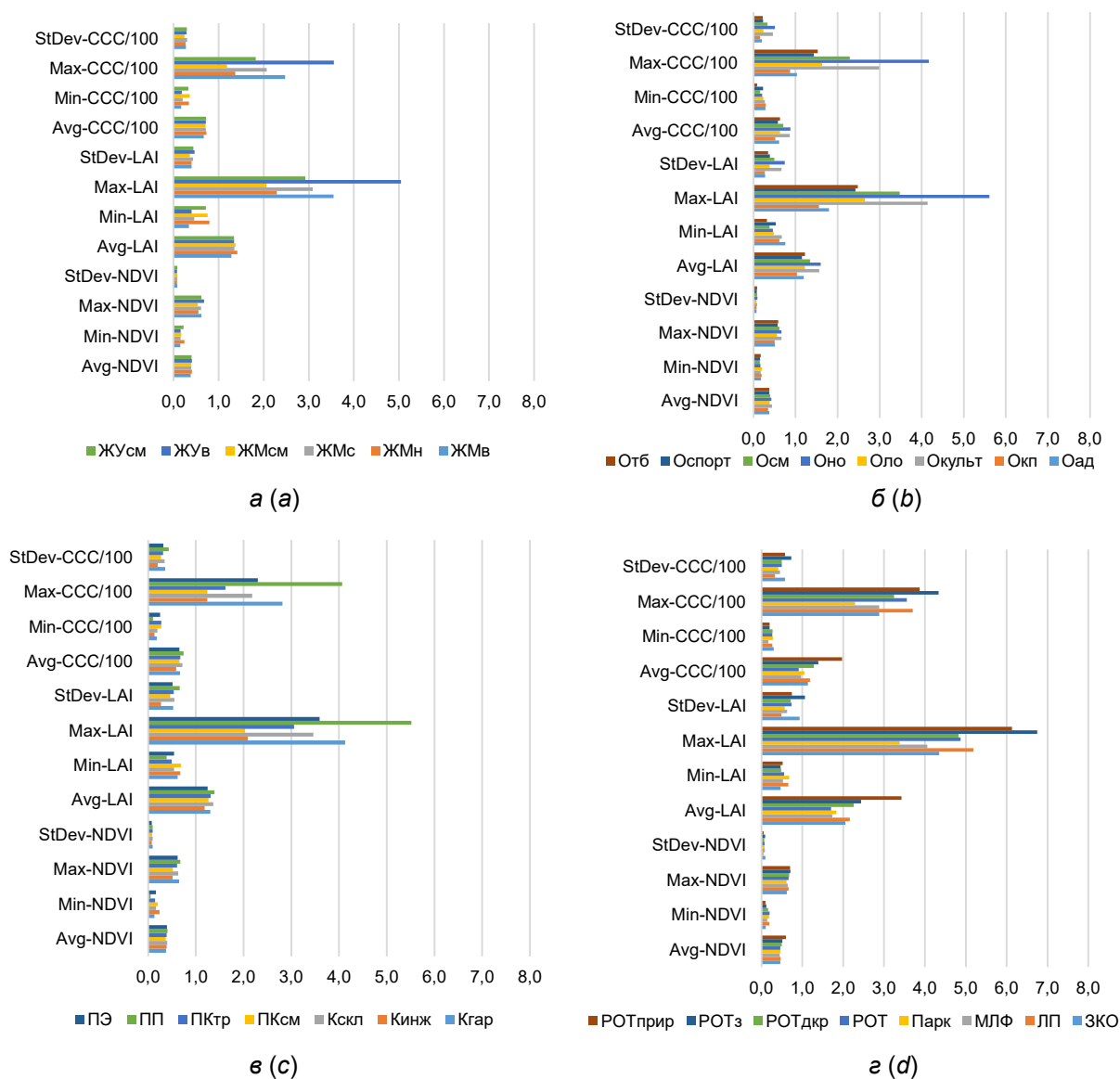


Рис. 5. Вегетационные индексы в ГТС г. Пинска: а – жилые; б – общественные; в – производственные и коммунально-складские; г – ландшафтно-рекреационные

Fig. 5. Vegetation indices in GTS of Pinsk: a – residential; b – public; c – industrial and communal warehouse; d – landscape-recreational

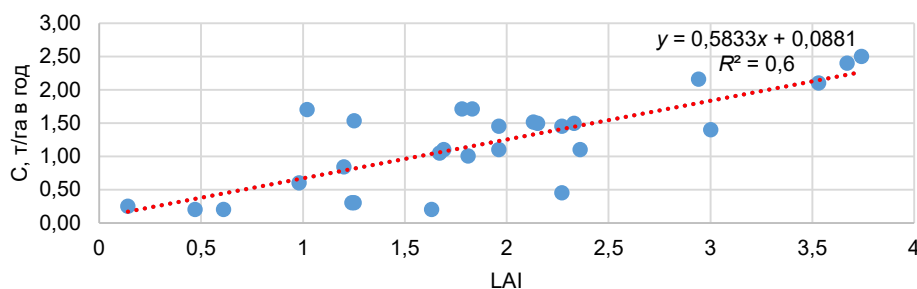


Рис. 6. Связь расчетных значений депонирования углерода (C, т/га в год) со средними значениями LAI на тестовых полигонах г. Пинска

Fig. 6. Relationships between calculated carbon sequestration values (C, tons per hectare per year) with average LAI values at test sites in Pinsk

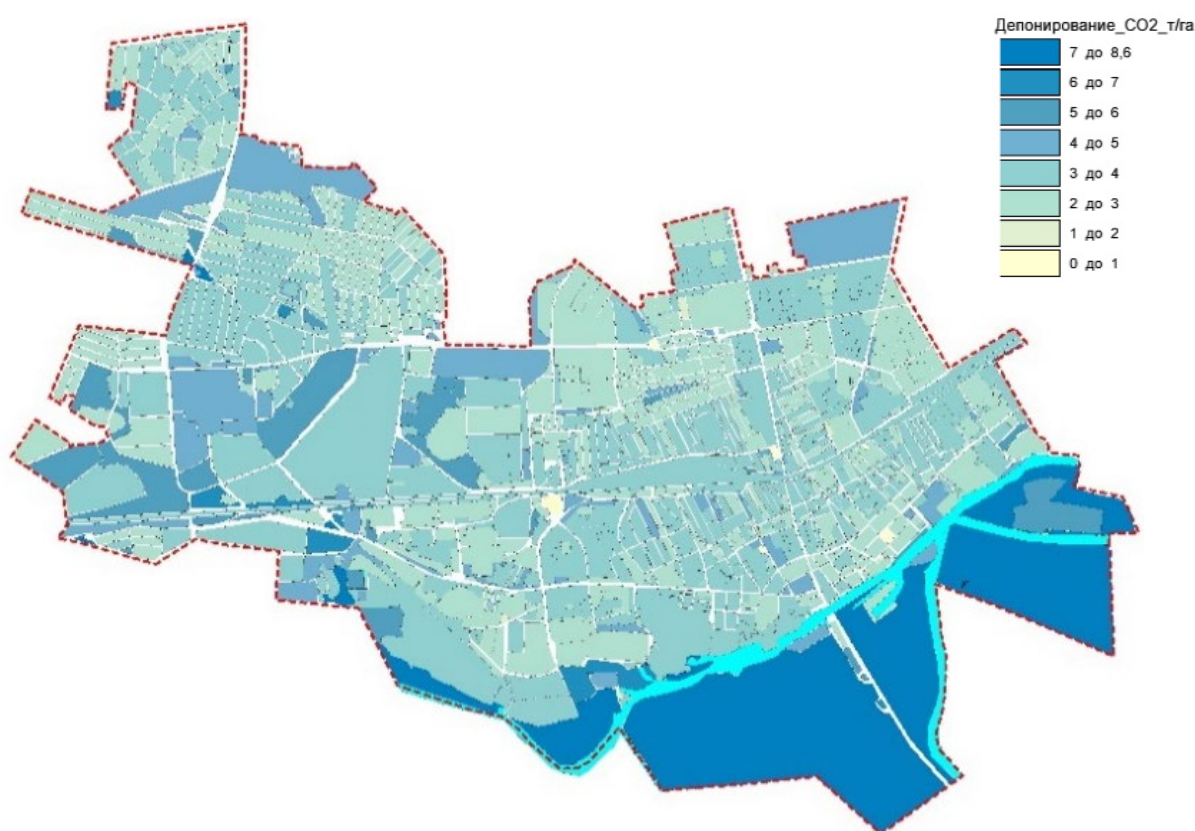


Рис. 7. Схема депонирования CO₂ растительным покровом в выделах ГТС г. Пинска, т/га в год

Fig. 7. Scheme of CO₂ sequestration by vegetation cover at GTS units in Pinsk, tons per hectare per year

В целом расчеты показали, что растительностью в составе основных ГТС г. Пинска ежегодно депонируется около 13,7 тыс. т углекислого газа. При этом на территории города наибольшее количество – близко к 8 тыс. т, депонируется насаждениями незастроенных озелененных территорий (ЛР ГТС), к которым относятся территории природного комплекса (заболоченные участки в долине рек Пины и Припяти, леса и лесопарки, парки, скверы, бульвары, защитные насаждения вблизи промышленных объектов, незастроенные резервные озелененные территории и др.). Насаждения в составе ГТС жилой усадебной застройки ежегодно ассимилируют около 2,8 тыс. т, в ГТС жилой многоквартирной и общественной застройки – 0,7 и 0,6 тыс. т соответственно, производственной и коммунальной – близко к 0,6 тыс. т.

Важнейшей для городов экосистемной функцией насаждений является регулирование микроклиматических условий. Информация о локализации городских «островов тепла» необходима для принятия мер по адаптации городского хозяйства к изменению климата.

Для г. Пинска оценка распределения значений LST выполнена в разрезе выделов ГТС, различного функционального назначения. Для улиц и автодорог оценку LST не проводили, поскольку характерная их ширина меньше пространственного разрешения снимков, что существенно снижает точность оценок. Картограмма распределения средних значений LST на городской территории отображена на рис. 8.

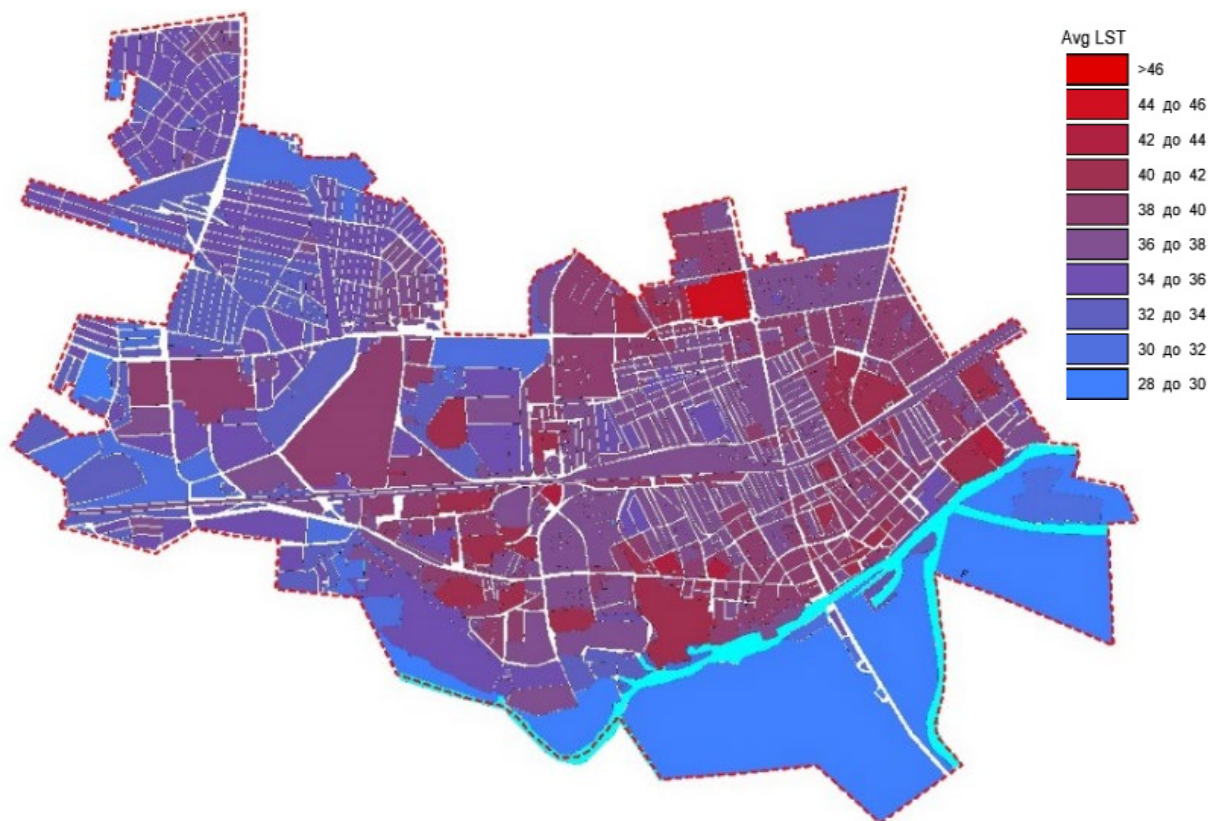


Рис. 8. Схема распределения средних значений температуры подстилающей поверхности (Avg_LST °C) в выделах ГТС в г. Пинске (дата съемки: 16.07.2024, 12 ч 07 мин местного времени)

Fig. 8. Distribution scheme of average land surface temperature values (Avg_LST °C) at GTS units in Pinsk (date: 16.07.2024, 12:07 a.m. local time)

Наиболее охлажденными на территории Пинска на момент съемки, как видно из картограммы на рис. 8, являются заболоченные территории долинного комплекса рек Пины и Припяти, городские леса, а также СХ ГТС и POT на северной и западной окраине города. Отмечается снижение LST в жилой усадебной застройке на северо-западной окраине города. Наиболее высокие средние и максимальные показатели LST регистрируются в производственных и коммунально-складских ГТС, в том числе на севере города (промплощадка СООО «ПП Полесье», Пинский мясокомбинат, западный пром-узел, ТЭЦ, ряд гаражных массивов), а также в отдельных общественных ГТС (Оспорт: напр., Ледовый дворец). Отмечаются повышенные показатели LST в отдельных кварталах ГТС новой жилой многоквартирной застройки (Радужный, Луги и др.), что можно связать с низкими показателями их озелененности из-за большого количества поверхностей с покрытием и молодых посадок. Оценка показателей LST выявила наибольшие различия LST между ЛР территориями и производственными, коммунально-складскими ГТС (рис. 9). Из элементов транспортной инфраструктуры (ТР*) LST оценивали для придорожных полос, отводов железной дороги и др.

Оценка связи между средней температурой подстилающей поверхности (LST_{avg}) и анализируемыми показателями растительности в г. Пинске показала наиболее значимые отрицательные связи LST с озелененностью (%) и средними значениями LAI в выделах ГТС (рис. 10).

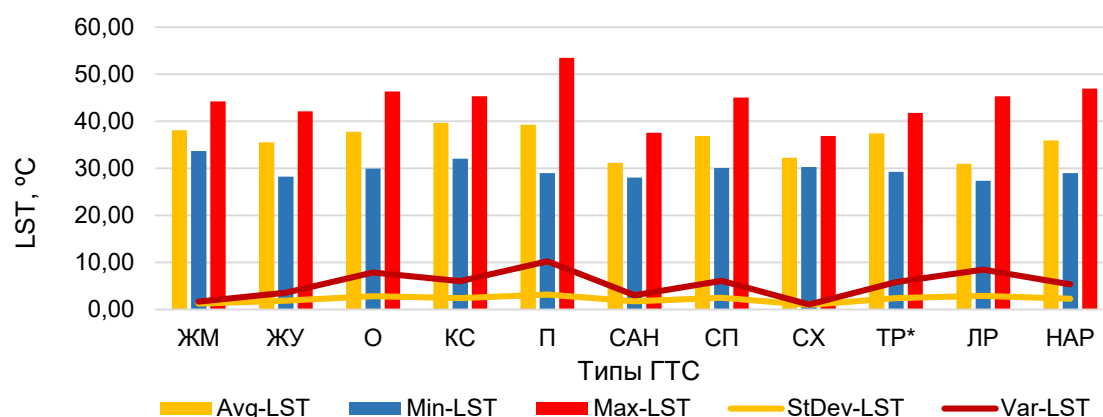
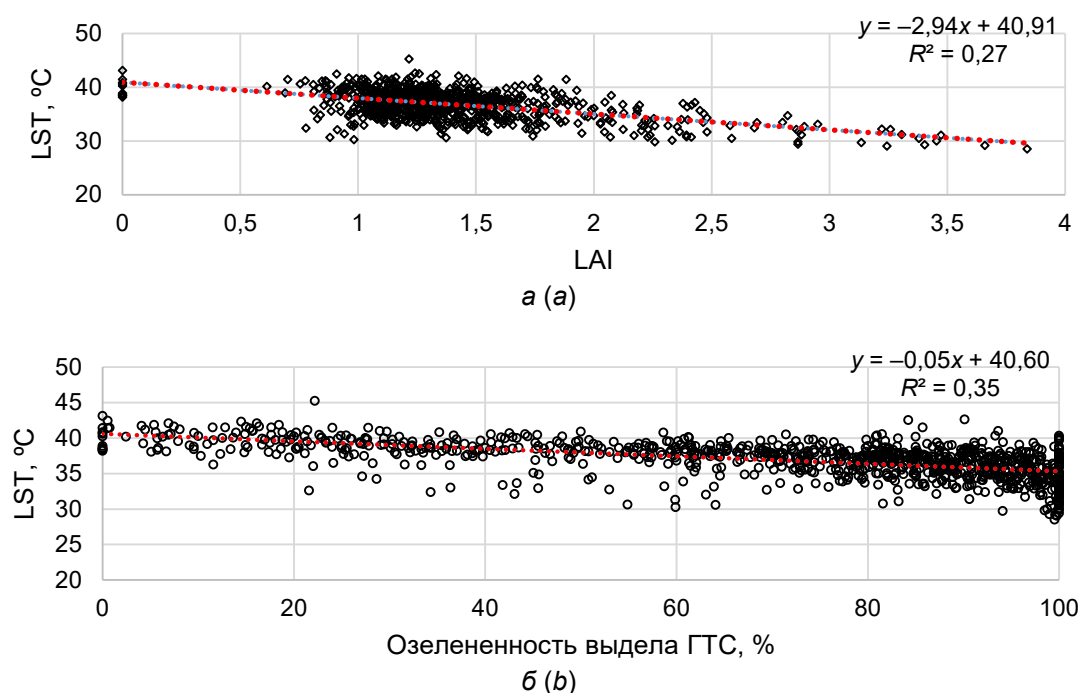


Рис. 9. Показатели LST в основных типах ГТС на территории г. Пинска

Fig. 9. LST values of main GTS types in Pinsk

Рис. 10. Связь средней температуры подстилающей поверхности (LST_{avg}):
а – со средними значениями LAI_{avg} ; б – со степенью озелененности (%) в выделах ГТС в г. ПинскеFig. 10. Relationships between average LST and:
а – average LAI values; б – greenery degree (%) of GTS units in Pinsk

Закключение. Используемый методический подход к дифференцированной оценке экосистемных функций озелененных территорий (депонирование CO_2 , климаторегулирующие) различных ГТС в городе предполагает выполнение совмещенного анализа данных ДЗЗ и ГИС-проекта города, дифференцированного в разрезе основных типов ГТС. Данный анализ позволил определить структуру интегральной ГТС г. Пинска. Для территории этого города построены дифференцированные карто-схемы распределения средних значений NDVI, LAI, LST, что позволило выявить участки с низкими показателями озелененности, слабым развитием растительного покрова. Оценка LST в г. Пинске за час до астрономического полдня летнего периода (июль 2024 г.) выявила на территории города участки с высокими значениями LST, к которым относятся территории промзон крупных предприятий, коммунальных объектов (гаражные массивы), новой жилой многоквартирной застройки, нарушенные территории (участки незавершенного строительства).

Проанализирована связь между значениями NDVI, LAI и CCC и депонированием углерода растительностью на точечных подспутниковых полигонах в г. Пинске, при этом наиболее сильная связь получена для LAI. Регрессионные уравнения связи депонирования углерода со средними значениями LAI характеризуются значением коэффициента детерминации 0,6. Полученные зависимости позволили создать дифференцированную картосхему депонирования CO₂ растительным покровом в выделах ГТС г. Пинска и рассчитать, что растительностью в составе основных ГТС г. Пинска ежегодно депонируется около 13,7 тыс. т углекислого газа. Установлены обратные отрицательные связи между средними на момент съемки значениями LST с одной стороны и LAI и степенью озелененности в выделах ГТС г. Пинска с другой. Соответствующие им значения коэффициента детерминации являются невысокими (0,27 и 0,35), что свидетельствует о влиянии на регистрируемую спутником температуру поверхности не только насаждений, но и других факторов городской среды (например: эмиссий техногенного тепла в промышленных ГТС, полива насаждений в жилой усадебной застройке, подтопления заболоченных территорий в пойме). Причинами неустранимого для данной работы их влияния являются как различие эффективного пространственного разрешения снимков LST и LAI, так и высокая расчлененность озелененных территорий в застроенной части г. Пинска и мелкоконтурность выделов ГТС, что в совокупности привело к участию в анализе пикселей LST со смешанными поверхностями.

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. 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 : Бел. наука, 2023. – 351 с.
3. Груммо, Д. Г. Научные основы и методология оценки структурно-функциональной организации растительного покрова Беларуси с использованием дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий : автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Груммо Дмитрий Геннадьевич ; Ин-т эксперим. ботаники НАН Беларуси. – Минск, 2025. – 48 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. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C. J. Tucker // Remote Sensing Environment. – 1979. – Vol. 8, iss. 2. – P. 127–150. – DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
8. Sen2Cor 2.12. – 2024. – URL: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> (date of access: 09.10.2024).
9. Richter, R. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide / R. Richter, D. Schläpfer. – DLR IB 565-01/15. – 2016. – 263 p.
10. Mayer, B. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use / B. Mayer, A. Kylling // Atmospheric Chemistry Physics. – 2005. – Vol. 5. – P. 1855–1877. – DOI: 10.5194/acp-5-1855-2005.
11. Pignatale, F. C. Sen2Cor 2.12.03 Configuration and User Manual. – 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).
12. 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.
13. Sentinel-2 Toolbox. – 2024. – URL: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox> (date of access: 09.09.2024).
14. Weiss, M. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 1.1) / M. Weiss, F. Baret. – 2016. – 53 p.
15. 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/wp-content/uploads/2023/03/%D0%97-%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F-%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F-%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%9D%D0%B8%D0%9F-17.01.06-001-2017.pdf> (дата обращения: 09.10.2024).
16. Планировка и застройка населенных пунктов = Планіроўка і забудова населеных пунктаў : СН 3.01.03-2020 / Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – 59 с.

17. 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.
 18. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). – М., 2008. – 886 с.
 19. Биogeоecенотическое разнообразие Беларуси: информационно-моделирующая система / Г. И. Сачок, Д. В. Татъянок, В. В. Коляда [и др.] – Минск : ИПИПРЭ АН Беларуси, 1996. – 240 с.
-
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. Grummo D. G., e.a. *Nazemnye i distancionnye metody ocenki sostoyaniya ekosistem osobo ohranyaemykh prirodnykh territorij* [Ground-based and remote sensing methods for assessing the state of ecosystems in specially protected natural areas]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2023, 351 p. (in Russian)
 3. Grummo D. G. *Nauchnye osnovy i metodologiya ocenki strukturno-funkcional'noj organizacii rastitel'nogo pokrova Belarusi s ispol'zovaniem distancionnogo zondirovaniya Zemli i geoinformacionnykh tekhnologij: avtoref. diss. ... dokt. biol. nauk* [Scientific foundations and methodology for assessing the structural and functional organization of vegetation in Belarus using remote sensing and geoinformation technologies. Dr. biol. sci. author's abstract diss.]. Minsk, 2025, 48 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 sistemakh 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. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 1979, vol. 8, iss. 2, pp. 127–150. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
 8. Sen2Cor 2.12. 2024. Available at: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> (accessed October 9, 2024).
 9. Richter R., Schläpfer D. Atmospheric/Topographic correction for satellite imagery: ATCOR-2/3 UserGuide. DLR IB 565-01/15, 2016, 263 p.
 10. 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: <http://dx.doi.org/10.5194/acp-5-1855-2005>.
 11. Pignatelli 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 October 9, 2024).
 12. 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: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2694881>.
 13. Sentinel-2 Toolbox. 2024. Available at: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox> (accessed September 9, 2024).
 14. Weiss M., Baret F. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 1.1). 02.05.2016, 53 p.
 15. EkoNIP 17.01.06-001-2017 *Ohrana okruzhayushej sredy i prirodopol'zovanie. 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/wp-content/uploads/2023/03/%D0%97%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%9D%D0%B8%D0%9F-17.01.06-001-2017.pdf> (accessed 9 October 2024). (in Russian)
 16. SN 3.01.03-2020. *Planirovka i zastrojka naselennykh punktov = Planirouka 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)
 17. Utkin A. I., Ermolova L. S., Utkina I. A. *Ploshad poverhnosti lesnykh rastenij: sushnost, parametry, ispol'zovanie* [Surface area of forest plants: essence, parameters, use]. Minsk, 2008, 292 p. (in Russian)
 18. *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)
 19. Sachok G. I., Tatyank D. V., Kolyada V. V., Kamyshenko G. A., Kolkovsky V. M., Rybka V. I. *Biogeocenoticheskoe raznoobrazie Belarusi: Informacionno-modeliruyushaya sistema* [Biogeocenotic diversity of Belarus: Information and modeling system]. Minsk, Institute of Natural Resource Management and Ecology of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 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@yandex.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

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

УДК 551.46

Поступила в редакцию 19.11.2025

Received 19.11.2025

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ГЕОСИСТЕМ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Ю. С. Давидович, А. Н. Червань

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы динамики состояния структуры почвенного покрова геосистем Белорусского Полесья. Основой выделения ключевых участков и тестовых валидационных полигонов внутри них являются данные оптического дистанционного зондирования Земли (Landsat 5 MSS/TM, Landsat 7 ETM+ и Landsat 8/9 OLI TIRS) с пространственным разрешением 30 м за период с 1998 по 2024 г., нормализованный вегетационный индекс NDVI, рассчитанный на их основе, материалы земельно-информационной системы, почвенно-экологическое и природно-мелиоративное районирование территории Беларуси.

Результаты исследований показали, что данные оптического диапазона длин волн, а также их производные в виде вегетационных индексов могут служить основой не только для выделения тестовых полигонов, но и для оценки состояния структуры почвенного покрова в пространственно-временном аспекте на основе статистических методов. Выделенные экстремумы NDVI объясняются как продуктивной способностью представленных на территории Белорусского Полесья почв, так и неоднородностью структуры почвенного покрова, и, как следствие, неоднородностью в структуре землепользования, орографическими условиями на немелиорированных территориях, а также влиянием широкомасштабной гидротехнической мелиорации. Динамика состояния геосистем в целом и структуры землепользования в их границах определена по группам почвенных мезокомбинаций (чередование более крупных, выраженных на мезорельефе, групп элементарных почвенных ареалов) и их сочетаниями.

Ключевые слова: структура почвенного покрова; данные дистанционного зондирования Земли; геосистема; нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI; Белорусское Полесье.

Для цитирования. Давидович Ю. С., Червань А. Н. Оценка динамики состояния структуры почвенного покрова геосистем Белорусского Полесья по данным дистанционного зондирования земли // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 75–87.

ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF THE STATE OF THE SOIL COVER STRUCTURE OF THE BELARUSIAN POLESIE GEOSYSTEMS BASED ON REMOTE SENSING DATA

Yu. S. Davidovich, A. N. Chervan

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. The study is devoted to issues of the soil cover structure state dynamics in the Belarusian Polesie geosystems. The identification of key sites and test validation polygons within them is based on optical remote sensing data (Landsat 5 MSS/TM, Landsat 7 ETM+, and Landsat 8/9 OLI TIRS) with a spatial resolution of 30 m from 1998 to 2024, the normalized vegetation index NDVI calculated on this basis, land information system data, and the soil-ecological and natural-amelioration zoning of the Belarus territory.

The research results showed that optical wavelength data, as well as their derivatives in the form of vegetation indices, can serve as a basis not only for identifying test polygons but also for assessing the state of the soil cover structure in the spatiotemporal aspect using statistical methods. The identified extremes of the NDVI are explained by both the soils productive capacity of the Belarusian Polesie region and the heterogeneity of the soil cover structure, resulting in heterogeneity in land use patterns, orographic features in unreclaimed areas, and the impact of large-scale hydrotechnical reclamation. The geosystems dynamics as an overall state and the land use structure within them are identified by the group of soil mesocombinations groups (alternation of larger groups of elementary soil areas expressed on the mesorelief), as well as their conjunctions.

Keywords: soil cover structure; Earth remote sensing data; geosystems; normalized difference vegetation index NDVI; Belarusian Polesie.

For citation. Davidovich Yu. S., Chervan A. N. Assessment of the dynamics of the state of the soil cover structure of the Belarusian Polesie geosystems based on remote sensing data. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 75–87.

Введение. Учение о структуре почвенного покрова является одним из важнейших и успешно развивающихся направлений современной географии почв Беларуси. Одной из главных идей В. В. Докучаева была идея о закономерном географическом распределении почв в связи с их генезисом [1]. Однако приоритет в постановке вопроса об изучении закономерностей строения почвенного покрова на небольших территориях принадлежит Н. М. Сибирцеву, который и заложил основы учения о структуре почвенного покрова [2].

Изучение неоднородности почвенного покрова несомненно послужило основой для развития другого научного направления – типологии земель. Своими корнями типология уходит в оценку земель, основы которой были заложены В. В. Докучаевым, развиты его учеником Н. М. Сибирцевым [3] и Л. Г. Раменским [4]. В дальнейшем типология земель легла в основу геосистемного подхода к изучению почвенного покрова [5].

В. М. Фридланд разработал учение о структуре почвенного покрова на основании всестороннего и глубокого обобщения идей о неоднородности почвенного покрова, высказанных В. В. Докучаевым, Н. М. Сибирцевым, С. А. Захаровым, Н. А. Димо, Я. Н. Афанасьевым, С. С. Неуструевым, Н. Д. Понагайбо, Г. А. Маландиным, Е. Н. Ивановой и другими исследователями. Были учтены представления Г. Н. Высоцкого об ороклиматических закономерностях размещения почв, Д. Милна – о «катенах», Б. Б. Польшова и М. А. Глазовской о геохимических сопряжениях в рельефе. В фундаментальную науку были введены понятия об элементарном почвенном ареале и его характеристиках, о почвенных комбинациях (общее понятие о неоднородностях почвенного покрова), группах почвенных комбинаций (мозаики, ташеты, комплексы, сочетания, вариации, пятнистости и др.) [6].

Изучению структуры почвенного покрова территории Беларуси, и особенно физико-географического региона Белорусского Полесья, связано с работами Т. А. Романовой [7], а также Н. И. Смеяна [8], Ю. П. Качкова [9], В. В. Стецко и Г. И. Ржеутской [10], Ф. Е. Шалькевича [11], А. А. Топаз [12], М. Ф. Курьянович [13]. Перспективными также являются не только оптические методы оценки состояния почвенно-растительного покрова, но и тепловые [14–16] и радиолокационные [17], показавшие свою эффективность при изучении структуры почвенного покрова Белорусского Полесья.

Слабоизученным остается вопрос использования вегетационных индексов для оценки не только состояния структуры почвенного покрова, но и его изменений в динамике [18–20]. Следует отметить, что без успешного методического решения данного вопроса прогнозирование состояния крупных природных территорий разной степени освоенности остается неэффективным в связи с невысокой степенью достоверности прогнозных моделей.

Объект и методы исследования. Физико-географический регион Белорусское Полесье находится на юге Беларуси и занимает площадь 65,3 тыс. км², что составляет 31,5 % территории страны. Несмотря на однородный рельеф, регион отличается высоким разнообразием и пестротой почвенного покрова, что усложняет его структуру [21]. Большую площадь провинции занимает Полесская низменность, резко выделяющаяся по своим природным особенностям, нашедшим отражение в развитии почвенно-растительного покрова. Геологическое строение провинции однообразно [22]. Характерной особенностью региона, особенно его западной и центральной частей, является то, что в нем находится большая часть осушенных болот и заболоченных земель республики, вовлеченных в сферу мелиоративного воздействия и используемых для возделывания полевых и луговых сельскохозяйственных культур. Под влиянием осушительной мелиорации и сельскохозяйственного использования происходят изменения агрофизических свойств почв [23].

В соответствии с разработанной типологией геосистем, идентифицированных по структуре почвенного покрова по различным иерархическим критериям (общая динамика природных процессов, географические, геоморфологические, гипсометрические и литологические условия), на территории Белорусского Полесья можно выделить достаточно большое количество их вариантов (табл. 1). По общей динамике природных процессов геосистемы, определяемые по формуле почвенных мезокомбинаций, делятся на внепойменные и пойменные. Орографически в пределах внепойменных геосистем выделяются водоразделы и депрессии, а в пределах пойменных – нерасчлененные и расчлененные поймы. Останцы надпойменной террасы не входят ни в одну из групп по общей динамике природных процессов и являются отдельной группой почвенных комбинаций. В отличие от внепойменных и пойменных геосистем они не разделяются по геоморфологическому критерию, занимая промежуточное положение между ними по происхождению. Геоморфологически водоразделы подразделяются на фрагментарные, выпуклые и плоские, а депрессии – на долинообразные и озеровидные. Расчлененные поймы делятся на прирусловые, центральные и притеррасные. По гипсометрическому критерию геосистемы водоразделов делятся на высокие и низкие, депрессии – на неглубокие и глубокие. Поймы и останцы надпойменной террасы подразделяются по уровню на высокие, средние и низкие. В соответствии с литологией почвообразующих пород внепойменные геосистемы включают варианты на рыхлых породах, двучленных породах без водоупора и с водоупором, суглинистых и глинистых породах, а также заторфованные.

Пойменные геосистемы развиваются на рыхлом и связном аллювии, а также пойменном торфе. Останцы надпойменной террасы включают почвообразующие породы как пойменных, так и внепойменных геосистем. Данные параметры закладываются в «коды» геосистем (рис. 1).

Таблица 1. Иерархические критерии идентификации геосистем [5, 24]

Table 1. Hierarchical criteria for identifying geosystems [5, 24]

Критерий(и)	Почвенные комбинации (типы земель)									
Общая динамика природных процессов	Внепойменные					Пойменные				4. Останцы первой надпойменной террасы
Орографические	1. Водоразделы			2. Депрессии		3. Поймы				
Геоморфологические	1. Фрагментарные	2. Выпуклые	3. Плоские	1. Долинообразные	2. Озоровидные	0. Нерасчлененные	1. Расчлененные			
							1. Приусловная	2. Центральная	3. Притеррасная	
Гипсометрические	1. Высокие 2. Низкие			1. Неглубокие 2. Глубокие		1. Высокого уровня 2. Среднего уровня 3. Низкого уровня				
Литологические (почвообразующие породы)	1. Рыхлые 2. Двучленные без водоупора 3. Двучленные с водоупором 4. Суглинистые 5. Глинистые 6. Торф					7. Рыхлый аллювий 8. Связный аллювий 9. Пойменный торф				

Классическими количественными признаками геосистем как природных образований являются их площадь, периметр, а также внутренняя неоднородность. Основной показатель неоднородности геосистем – коэффициент неоднородности – рассчитывается как произведение коэффициентов контрастности и расчлененности почвенных мезокомбинаций групп элементарных почвенных ареалов. Существуют различные способы их вычисления, отличающиеся незначительно, но общий подход остается неизменным [25].

Данные критерии геосистем являются классическим при использовании почвенных карт и материалов землеустройства, однако они должны дополняться и критериями, позволяющими более объективно оценивать текущую ситуацию, в том числе с использованием данных дистанционного зондирования Земли и наземных обследований [26–29].

Для определения критериев подбора тестовых полигонов в границе групп ключевых участков (почвенных мезокомбинаций) были подобраны мультиспектральные космические изображения спутниковых систем Landsat 5 MSS/TM, Landsat 7 ETM+ и Landsat 8/9 OLI TIRS с пространственным разрешением 30 м с 1998 по 2024 г. (в количестве 15 сцен). Подбор и загрузку данных дистанционного зондирования Земли производили с использованием сервиса Геологической службы США Earth Explorer. В соответствии с оптимальными сроками аэрокосмических съемок [30] были получены апрельские снимки перечисленных выше спутниковых съемочных систем пакета Landsat Collection 2 Level 2, в который были включены продукты выполнения атмосферной и температурной коррекции с использованием алгоритмов отражения LEDAPS и LaSRC [31].

Так как исследование предусматривает оценку динамики, данные дистанционного зондирования Земли должны быть подвержены радиометрической и атмосферной коррекции, но в данном пакете и уровне обработки они уже были включены. Данные Landsat Level-2 записываются в виде масштабированных целых чисел, что позволяет преобразовывать данные из формата с плавающей запятой в целые числа для более быстрой их обработки. В большинстве случаев они записываются в 16-битном целом числе, что экономит дисковое пространство и ускоряет их загрузку.

К значению каждого пикселя мультиспектрального изображения с плавающей запятой необходимо применить коэффициент смещения, результат которого затем умножается на коэффициент усиления для перевода значения в диапазон 16-битного целого числа (или беззнакового целого числа). Эти

значения называются масштабированными целыми числами. Чтобы пользователь мог вернуть данные к исходному значению с плавающей запятой, для каждого диапазона предоставляются масштабный коэффициент и смещение. Масштабный коэффициент следует применить к каждому пикселю, а затем добавить смещение (т. е. цифровое число (DN) необходимо умножить на масштабный коэффициент и прибавить к нему значение смещения). В данном случае, так как обрабатывались данные оптического и ближнего инфракрасного диапазона длин волн, масштабный коэффициент и коэффициент смещения составили 0,0000275 и –0,2 соответственно [32].

Были задействованы следующие каналы мультиспектрального изображения: синий (Blue, диапазон длин волн – 452–512 нм), зеленый (Green, 533–590 нм), красный (Red, 636–673 нм), ближний инфракрасный (NIR, 851–879 нм). Для возможности сопоставления спутниковых данных необходимо было также выполнить пересчет значений пикселей с учетом различий в значениях зенитного угла Солнца в момент измерений:

$$k = \cos (z), \quad (1)$$

где z – значение зенитного угла Солнца в момент проведения измерений.

Существует два подхода к дальнейшему анализу спектральных данных. В первом варианте и космические, и авиационные данные необходимо разделить на соответствующие вычисленные коэффициенты. Во втором варианте один из наборов данных необходимо умножить на отношение коэффициентов. В текущем исследовании выбран первый вариант, так как это позволяет использовать полученные результаты в дальнейшем при сопоставлении с любыми другими данными.

В литературных источниках для анализа состояния почвенно-растительного покрова по данным авиакосмических измерений применяют различные вегетационные индексы. Можно использовать как простые и нормированные соотношения в спектральных каналах [33], так и более сложные индексы [34], значение которых зависит от качества проведенной предварительной обработки данных (радиометрической калибровки, атмосферной коррекции и др.). Исходя из результатов проведенных исследований и исходных данных был выбран наиболее репрезентативный вегетационный индекс – нормализованный разностный вегетационный индекс:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red). \quad (2)$$

Обработку данных дистанционного зондирования Земли, в том числе и расчет вегетационного индекса NDVI, производили в программном продукте ENVI 5.6. Последующую картометрическую обработку результатов тематического дешифрирования выполняли в программе ArcGIS Pro 3.2.

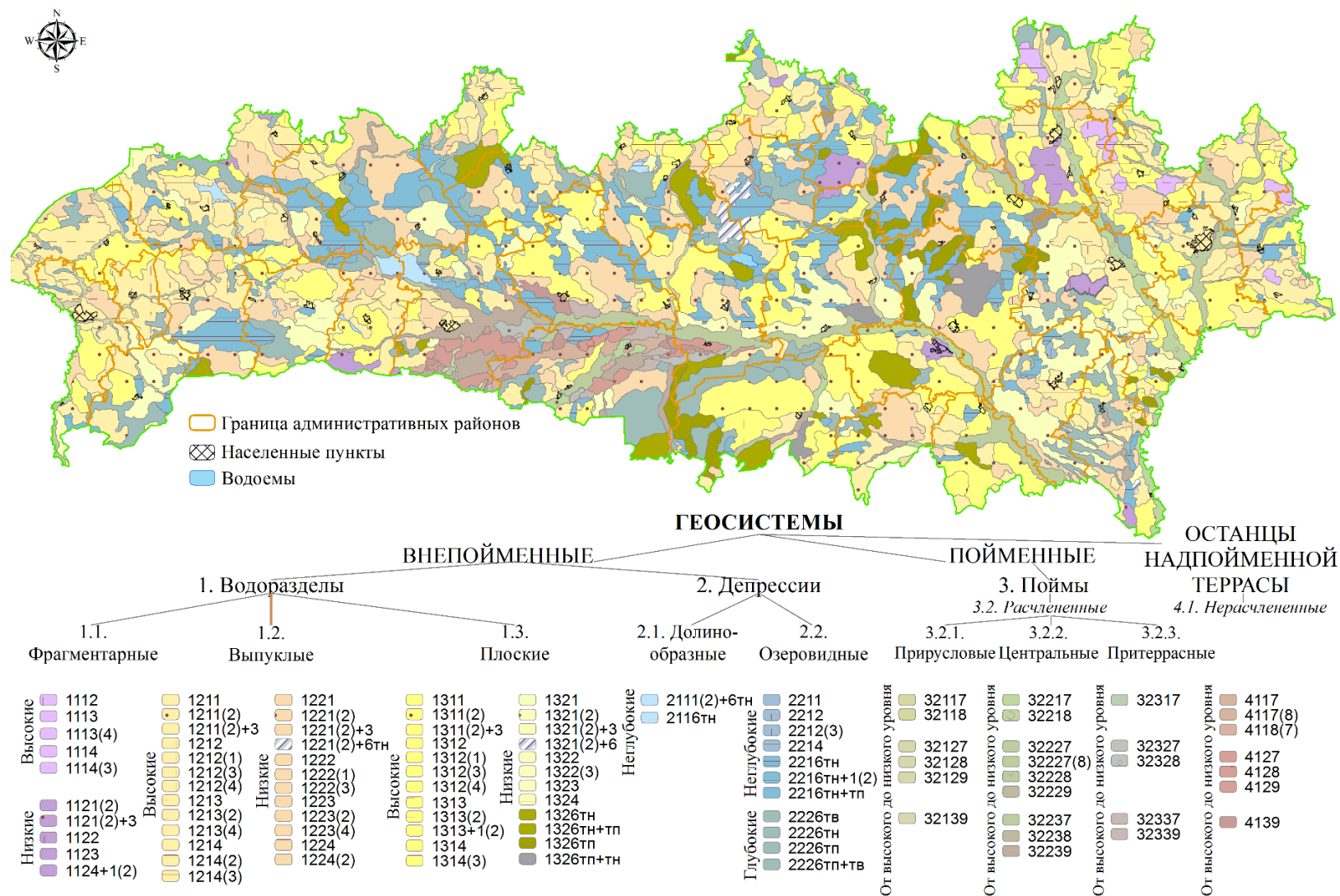
По границам почвенных мезокомбинаций рассчитывали средние, минимальные, максимальные и амплитудные значения нормализованного дифференцированного вегетационного индекса NDVI в пределах выделенных тестовых полигонов (с учетом различного вида землепользования) [35], показанных на рис. 2. Провели маршрутную верификацию более 100 репрезентативных тестовых полигонов с определением в полевых условиях основных параметров состояния почвенных мезокомбинаций.

Для достоверной оценки структуры почвенного покрова рассчитали ранговые коэффициенты корреляции по каждой из групп значений индекса в границах геосистем. По данной методике производили их расчет и в границах различного землепользования: пахотных земель, многолетних насаждений, земель под древесно-кустарниковой растительностью, луговых и лесных земель, болотных и водных объектов, нарушенных и неиспользуемых земель. Границы видов земель были получены по данным Геопортала данных Республики Беларусь.

Исходными данными для геосистемного анализа в пределах физико-географического региона Белорусского Полесья послужили материалы локальных земельно-информационных систем, в частности тематические слои в почвенном покрове, а также разномасштабные планово-картографические сведения о физико-географических условиях региона.

В итоге была сформирована база данных в программной среде ГИС с использованием специализированного программного обеспечения (ArcGIS Pro 3.2, ENVI 5.6, SNAP 13.0) для типологии геосистем, включающая:

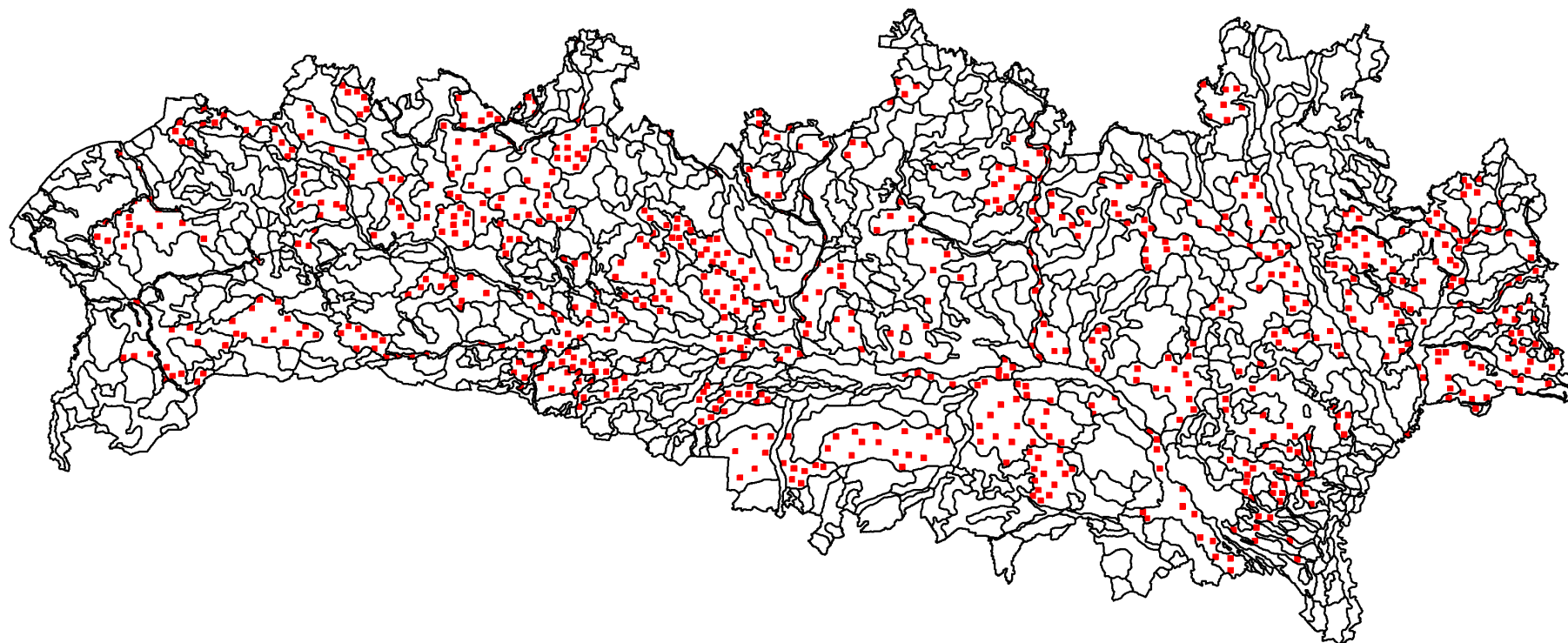
- информацию почвенных карт (масштабов 1 : 50 000 и 1 : 10 000) административных районов и агроландшафтов (сельскохозяйственных организаций);
- материалы схем землеустройства районов, схем внутрихозяйственного и межхозяйственного землеустройства сельскохозяйственных организаций (масштабов 1 : 50 000 и 1 : 10 000);
- материалы кадастровой оценки земель сельскохозяйственных организаций;
- исходные данные дистанционного зондирования Земли;
- результаты расчета нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI.



Масштаб 1 : 2 000 000 (основа 1 : 50 000)

Рис. 1. Геосистемы Белорусского Полесья, идентифицированные по структуре почвенного покрова [5]

Fig. 1. Geosystems of Belarusian Polesie identified by the structure of the soil cover [5]



Масштаб 1 : 2 000 000

Рис. 2. Тестовые полигоны геосистем Белорусского Полесья

Fig. 2. Test sites for geosystems of Belarusian Polesie

Результаты исследования и их обсуждение. Наиболее статистически достоверными в пространственно-временном анализе оказались амплитудные значения нормализованного вегетационного индекса NDVI. В данном случае корреляции между амплитудами односезонных значений является наиболее статистически значимым критерием оценки динамики состояния почвенных комбинаций в целом (табл. 2) и по структуре землепользования (табл. 3). Следует отметить, что критерием оценки было не только наличие корреляции значимого уровня, но и ее временной тренд за 26-летний период (увеличение, уменьшение, отсутствие изменений).

Таблица 2. Динамика коэффициента корреляции амплитуд нормализованного дифференцированного вегетационного индекса NDVI между различными датами в границах геосистем

Table 2. Dynamics of the correlation coefficient of the amplitudes of the normalized differentiated vegetation index NDVI between different dates within the boundaries of geosystems

Ключевые геосистемы (группы ключевых участков)	Корреляция между амплитудами NDVI		
	за 1998 и 2000 г.	за 2000 и 2014 г.	за 2014 и 2024 г.
1113(4)	0,24	0,38	0,32
1121(2,3)	0,93	0,24	0,03
1122, 1123	0,98	0,43	0,49
1211, 1211(2), 1213	0,85	0,85	0,53
1211(2,3), 1212(3), 1213	0,96	0,45	0,31
1214	0,91	0,30	0,29
1221, 1221(2)	0,86	0,17	0,22
1222	0,70	0,32	0,67
1223	0,64	0,22	0,14
1224	0,64	0,23	0,34
1311	0,79	0,01	0,04
1311(2)	0,80	0,54	0,64
1313	0,95	0,37	0,32
1314	0,85	0,23	0,17
1321, 1321(2)	0,93	0,67	0,72
1326тн	0,13	0,22	0,17
1326тп	0,12	0,24	0,03
2216тн	0,71	0,28	0,54
2226тн	0,63	0,52	0,65
2226тв, 2226тп	0,18	0,38	0,11
32127	0,20	0,02	0,02
32129, 32139	0,44	0,25	0,08
32227, 32228	0,07	0,31	0,14
32237	0,37	0,34	0,52
32239	0,23	0,25	0,24
3339	0,01	0,40	0,05
4117	0,06	0,41	0,24
4127	0,03	0,53	0,13
4139	0,96	0,78	0,52

Таблица 3. Динамика коэффициента корреляции амплитуд нормализованного дифференцированного вегетационного индекса NDVI между различными датами в границах групп видов земель

Table 3. Dynamics of the correlation coefficient of the amplitudes of the normalized differentiated vegetation index NDVI between different dates within the boundaries of land type groups

Группы видов земель	Корреляция между амплитудами индекса NDVI		
	за 1998 и 2000 г.	за 2000 и 2014 г.	за 2014 и 2024 г.
Пахотные пригодные	0,66	0,59	0,58
Многолетние насаждения	0,49	0,46	0,74
Луговые	0,54	0,33	0,22
Лесные	0,14	0,13	0,19
Древесно-кустарниковая растительность	0,54	0,09	0,07
Болотные	0,37	0,07	0,46
Водные	0,72	0,54	0,73
Нарушенные и неиспользуемые	0,69	0,43	0,63

Из данных табл. 2 и 3 видно, что за 26-летний период (1998–2024 гг.) структура почвенно-растительного покрова становится в среднем более динамичной и менее устойчивой, о чем свидетельствует снижение коэффициентов корреляции NDVI между ранними и поздними интервалами времени как в пределах отдельных геосистем, так и в группах типов земель. Наиболее резкие изменения приходятся на отрезок с 2014 по 2024 г., где у части геосистем корреляция опускается до 0,02–0,14, что соответствует сильному изменению и нарушению структуры почвенно-растительного покрова.

В пределах одних и тех же групп геосистем наблюдается сильный контраст по устойчивости их состояния, что указывает на высокую мозаичность их структуры. Например, геосистемы 1321 и 1321(2) остаются высоко согласованными во времени (0,93–0,72), тогда как геосистема 1326 демонстрирует крайне низкие значения (0,12–0,24–0,03), свидетельствуя о неоднородности в использовании и нарушении почв в землепользовании даже в формально схожих условиях. Аналогично геосистемы 2216тн, 2226тн, 2226тв и 2226тп отличаются как относительно устойчивым (0,63–0,65), так и резко дестабилизированным (0,18–0,11) изменением их состояния.

С 1998 по 2000 г. значительная часть геосистем имеет высокую корреляцию NDVI (0,70–0,98), что отражает устойчивую сезонную и межгодовую динамику почвенно-растительного покрова при относительно стабильном режиме природопользования. К периоду с 2014 по 2024 г. диапазон смещается в сторону средних и низких значений (часто 0,2–0,5 и ниже), что указывает на изменение структуры видов земель (высокая распашка, наличие санитарных рубок, застройка, признаки вторичной сукцессии) и усиление климатических аномалий (засух, переувлажнения некоторых угодий), влияющих на значения как самого NDVI, так и корреляций между его значениями. Особенно показателен контраст между «устойчивыми» геосистемами (например, 4139: 0,96–0,78–0,52) и геосистемами, практически потерявшими ее (1311: 0,79–0,01–0,04).

При анализе групп видов земель (см. табл. 3) видно, что корреляции в целом выше и менее вариативны, что отражает эффект сглаживания за счет усреднения разных локальных критериев внутри группы. Тем не менее даже на этом уровне заметна тенденция к снижению динамики: корреляция 0,66–0,74 в период с 1998 по 2000 г., часто опускающаяся до 0,43–0,54 и ниже в период с 2014 по 2024 г., а у наиболее уязвимых групп видов земель она падает до 0,07–0,19, что указывает на кардинальную смену доминирующих фитоценозов или режимов использования. Наиболее устойчивыми, судя по высоким значениям во всех трех периодах (0,58–0,73), вероятно, являются мало нарушенные лесные или природные экосистемы, тогда как низкие значения характерны для интенсивно трансформируемых агроландшафтов и территорий, подверженных техногенному воздействию.

Сочетание высокостабильных (0,7–0,9) и крайне нестабильных (менее 0,2) геосистем в пределах тестовых полигонов указывает на наличие природных экосистем, не подверженных изменениям, и зон интенсивной трансформации соответственно. Такие данные определяют границы мероприятий в природоохранной деятельности, так и пространственно-временные решения в территориальном планировании в рамках разрабатываемых схемах землеустройства административных районов. Геосистемы с устойчиво высокими корреляциями индекса NDVI во всех трех временных интервалах могут рассматриваться как эталонные и могут быть использованы для локализации мероприятий по сохранению педо- и биоразнообразия, тогда как участки с резким падением корреляции (1311, 32127 и др.)

требуют детального полевого обследования, оценки видов и направленности нарушений и разработки мер по адаптации их к меняющимся климатическим условиям.

Идентифицируемые экстремумы можно объяснить:

- 1) продуктивной способностью почвенного покрова;
- 2) неоднородностью структуры почвенного покрова и, как следствие, неоднородностью в структуре землепользования;
- 3) преобладанием орографического фактора на немелиорированных территориях (как, например, в границах плоских высоких водоразделов на рыхлых почвообразующих породах – 1311);
- 4) влиянием широкомасштабной гидротехнической мелиорации.

Объединенные группы в соответствии с указанными критериями позволяют сделать вывод об особенностях динамики геосистем в целом и по структуре землепользования.

Заключение. Для оценки состояния структуры почвенного покрова геосистем в наземных условиях необходима выработка определенных критериев и параметров, которые наиболее полно характеризуют физико-географический регион в целом и на отдельных территориях. Данными критериями могут являться агротехнологическая контрастность, увлажнение, эродированность, завалуненность, окультуренность, опасность дефляции и минерализации осушенных торфяников и др. [36].

Геосистемный подход позволяет сформировать методологическую и пространственно-временную основу для объединения данных земельно-информационной системы, дистанционного зондирования Земли и мониторинга земель для целей рационального природопользования, предполагающего эффективное использование природных ресурсов и охрану окружающей среды как в рассматриваемом физико-географическом регионе, так и на территории всей Беларуси.

Закономерное пространственное размещение геосистем, выявляемое при анализе результатов крупно- и среднемасштабного картографирования почвенного покрова и созданное многократным повторением одного или нескольких различных основных образующих ее элементов (почвенных комбинаций) предопределяет возможность их типологии, характеризующейся схожими уровнями почвенно-ресурсного потенциала и реакцией на внешнее воздействие по направлениям природопользования. Типология геосистем Белорусского Полесья открывает возможность системного учета природных условий для идентификации оптимальных направлений природопользования в регионе, в том числе с учетом пространственно-временного фактора и вегетационных индексов, позволяющих оперативно оценить фактические условия землепользования.

Таким образом, объединение геосистемного подхода в совокупности со статистическими и дистанционными методами исследований позволяет сформировать методологическую и пространственно-временную основу для объединения данных земельно-информационной системы, дистанционного зондирования и мониторинга земель в целях территориального планирования, предусматривающего эффективное использование природных ресурсов и охрану окружающей среды как в регионе Белорусского Полесья, так и на территории всей Беларуси.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (Грант Министерства образования Республики Беларусь на выполнение научно-исследовательских работ докторантов, аспирантов, соискателей и студентов; № ГР 20252872).

Acknowledgements. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education of the Republic of Belarus (Grant of the Ministry of Education of the Republic of Belarus for the implementation of research work by doctoral students, postgraduate students, applicants, and students; No. GR 20252872).

Список использованных источников

1. Докучаев, В. В. О происхождении русского чернозёма / В. В. Докучаев // Заседание Санкт-Петербургского собрания сельских хозяев. – 1884. – № 3. – С. 1–15.
2. Бараков, П. Ф. Н. М. Сибирцев, его жизнь и деятельность / П. Ф. Бараков, К. Д. Глинка, Н. А. Богословский // Почвоведение. – 1901. – № 4. – С. 1–40.
3. Добровольский, Г. В. Развитие учения о структуре почвенного покрова как раздела географии почв / Г. В. Добровольский // Почвоведение. – 1993. – № 2. – С. 98–103.
4. Раменский, Л. Г. О принципиальных установках, основных понятиях и терминах производственной типологии земель, геоботаники и экологии // Советская ботаника. – 1935. – № 4. – С. 25–42.
5. Червань, А. Н. Типология геосистем Белорусского Полесья / А. Н. Червань, Ю. С. Давидович // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2024. – № 2. – С. 3–23.
6. Иванов, И. В. Научные идеи почвовед-географа В. М. Фридланда, их истоки и развитие (к 100-летию со дня рождения) / И. В. Иванов, И. В. Замотаев // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2020. – № 101. – С. 202–219. – DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-202-219.

7. Романова, Т. А. Типология земель поймы р. Припяти по материалам аэрофотосъемки / Т. А. Романова, Ф. Е. Шалькевич // Почвоведение. – 1985. – № 1. – С. 5–14.
8. Аэрокосмические методы в почвоведении и их использование в сельском хозяйстве. – М. : Наука, 1990. – 247 с.
9. Дистанционное зондирование почвенного покрова Беларуси / Ю. П. Качков, Ф. Е. Шалькевич, А. А. Лепешев, О. Ю. Панасюк // Почвоведение и агрохимия. – 2008. – № 1. – С. 33–40.
10. Стецко, В. В. Гидрогеологические и геоморфологические условия формирования структуры почвенного покрова Припятского Полесья / В. В. Стецко, Г. А. Ржеутская // Вестник Белорусского государственного университета имени В. И. Ленина. Серия 2, Химия. Биология. География. – 1982. – № 1. – С. 59–64.
11. Шалькевич, Ф. Е. Агроэкологическое микрорайонирование почв р. Припять на основе методов дистанционного зондирования / Ф. Е. Шалькевич, Ю. П. Качков, А. А. Топаз // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 2, Химия. Биология. География. – 1999. – № 3. – С. 61–66.
12. Топаз, А. А. Анализ структуры почвенного покрова на основе цифровой обработки аэрофотоснимков (на примере долины р. Припять) / А. А. Топаз // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 2, Химия. Биология. География. – 2006. – № 1. – С. 74–78.
13. Курьянович, М. Ф. Картографирование неоднородности почвенного покрова осушенных земель Белорусского Полесья на основе материалов дистанционного зондирования / М. Ф. Курьянович // Почвоведение и агрохимия. – 2013. – № 2. – С. 55–63.
14. Курьянович, М. Ф. Использование инфракрасных тепловых космических снимков для изучения почвенного покрова / М. Ф. Курьянович, Ю. С. Давидович, Ф. Е. Шалькевич // Почвоведение и агрохимия. – 2022. – № 1. – С. 21–31.
15. Грубина, П. Г. Возможности использования данных тепловой съемки для детектирования основных параметров плодородия пахотных почв / П. Г. Грубина, И. Ю. Савин, Е. Ю. Прудникова // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2020. – № 105. – С. 146–172. – DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-146-172.
16. Chervan, A. N. Modeling of the 50-year dynamics of the reclaimed lands vulnerability to wind soil erosion // The Region of Pripyat Polesye / A. N. Chervan, Y. S. Davidovich, A. L. Kindeev // Geography. Environment. Sustainability. – 2024. – № 4. – P. 198–204. – DOI: 10.24057/2071-9388-2024-3290.
17. Особенности дешифрирования почвенно-растительного покрова типов земель Белорусского Полесья по материалам радиолокационной съемки / Ф. Е. Шалькевич, Ю. С. Давидович, А. А. Топаз, М. Ф. Курьянович // Земля Беларуси. – 2023. – № 4. – С. 47–57.
18. Савин, И. Ю. Перспективы развития картографирования и мониторинга почв на основе интерполяции точечных данных и дистанционных методов / И. Ю. Савин // Вестник Московского университета. Серия 17, Почвоведение. – 2022. – № 2. – С. 13–19.
19. Савин, И. Ю. Современные тренды и проблемы почвенной картографии / И. Ю. Савин, А. В. Жоголев, Е. Ю. Прудникова // Почвоведение. – 2019. – № 5. – С. 517–528. – DOI: 10.1134/S0032180X19050101.
20. Буряк, Ж. А. Оценка спектрально-отражательных свойств эродированных агропочв Республики Татарстан / Ж. А. Буряк, А. М. Гафуров // Региональные геосистемы. – 2025. – № 3. – С. 517–532. – DOI:10.52575/2712-7443-2025-49-3-517-532 EDN: ОМЕКВН.
21. Нацыянальны атлас Беларусі. – Мінск : Белкартаграфія, 2024. – 348 с.
22. География почв Беларуси : учеб. пособие / Н. В. Клебанович, В. С. Аношко, Н. К. Чертко [и др.]. – Минск : БГУ, 2011. – 183 с.
23. Современное состояние агрофизических свойств мелиорированных почв Белорусского Полесья / В. С. Аношко, Л. Ф. Вашкевич, С. С. Бачила [и др.] // Структура и морфогенез почвенного покрова в условиях антропогенного воздействия : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 17–20 сент. 2013 г. / редкол.: И. И. Пирожник (гл. ред.), Н. В. Клебанович (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, 2013. – С. 162–165.
24. Романова, Т. А. Теоретические основы и практическая значимость исследований структуры почвенного покрова / Т. А. Романова, А. Н. Червань, В. Л. Андреева // Почвоведение. – 2011. – № 3. – С. 300–310.
25. Смирнова, М. А. Количественная оценка почвенного разнообразия: теория и методы исследования / М. А. Смирнова, А. Н. Геннадиев // Вестник Московского университета. Серия 5, География. – 2017. – № 4. – С. 3–11.
26. Годельман, Я. М. Методика определения системы параметров структуры почвенного покрова / Я. М. Годельман. – Кишинев : Молдагроинформреклама, 1989. – 36 с.
27. Кауричев, И. С. Структура почвенного покрова и типизация земель : учебное пособие / И. С. Кауричев, Т. А. Романова, Н. П. Сорокина. – М. : Изд-во МСХА, 1992. – 151 с.
28. Савин, И. Ю. Комплексная оценка неоднородности почвенного покрова по состоянию посевов / И. Ю. Савин, С. А. Бербеков, Д. А. Тутукова // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2022. – Вып. 113. – С. 37–57. – DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-31-57.
29. Лысенко, С. А. Оценки современных изменений биоклиматических параметров почвенно-растительного покрова Гомельской области / С. А. Лысенко, М. А. Хитриков // Природные ресурсы. – 2024. – № 2. – С. 17–29.
30. Шалькевич, Ф. Е. Тематическое дешифрирование : пособие / Ф. Е. Шалькевич, М. Ф. Курьянович. – Минск : БГУ, 2022. – 131 с.
31. Шестаков, Н. А. Анализ методов атмосферной коррекции ДДЗ (на примере снимков Landsat-8) для получения наиболее репрезентативных данных о спектрально-отражательных свойствах растительного покрова / Н. А. Шестаков, Ю. С. Давидович, Е. В. Казяк // ГИС-технологии в науках о Земле : материалы респ. науч.-

- практ. семинара студентов и молодых ученых, Минск, 17 нояб. 2021 г. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: Н. В. Жуковская (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2021. – С. 212–220.
32. USGS : [сайт]. – USA , 2025. – URL: <https://www.usgs.gov/faqs> (дата обращения: 01.10.2025).
 33. Черепанов, А. С. Вегетационные индексы / А. С. Черепанов // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 98–102.
 34. Чимитдоржиев, Т. Н. Технология совместного анализа временных рядов изображений интерферометрической когерентности Sentinel-1 и вегетационного индекса по данным Sentinel-2 для мониторинга сельскохозяйственных полей / Т. Н. Чимитдоржиев, А. В. Дмитриев, П. Н. Дагуров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 61–72. – DOI:10.21046/2070-7401-2020-17-4-61-72.
 35. Давидович, Ю. С. Методика типологического отбора территориальных единиц для дистанционной оценки состояния геосистем Белорусского Полесья / Ю. С. Давидович // Молодежь XXI века: образование, наука, инновации : материалы XI Междунар. конф. и аспирантов и молодых ученых, Витебск, 6 дек. 2024 г. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: Е. Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. – Витебск : ВГУ им. П. М. Машерова, 2024. – С. 26–27.
 36. Типизация земель и использование ее результатов при формировании рабочих участков / Ю. П. Качков, О. Ф. Башкинцева, В. М. Яцухно, А. Ф. Черныш // Земля Беларуси. – 2011. – № 3. – С. 41–48.

References

1. Dokuchaev V. V. *O proishozhdenii russkogo chernozyoma* [On the origin of Russian black soil]. *Zasedanie Sankt-Peterburgskogo sobraniya sel'skih hozyaev = Meeting of the St. Petersburg Assembly of Rural Owners*, 1884, no. 3, pp. 1–15. (in Russian)
2. Barakov P. F., Glinka K. D., Bogoslovskij N. A. N. M. Sibircev, ego zhizn' i deyatel'nost' [N. M. Sibirtsev, his life and work]. *Pochvovedenie = Soil Science*, 1901, no. 4, pp. 1–40. (in Russian)
3. Dobrovolskij G. V. *Razvitie ucheniya o strukture pochvennogo pokrova kak razdela geografii pochv* [Development of the doctrine of the structure of the soil cover as a section of soil geography]. *Pochvovedenie = Soil Science*, 1993, no. 2, pp. 98–103. (in Russian)
4. Ramenskij L. G. *O principial'nyh ustanovkah, osnovnyh ponyatiyah i terminah proizvodstvennoj tipologii zemel', geobotaniki i ekologii* [On the fundamental principles, basic concepts and terms of industrial typology of lands, geobotany and ecology]. *Sovetskaya botanika = Soviet Botany*, 1935, no. 4, pp. 25–42. (in Russian)
5. Chervan' A. N., Davidovich Yu. S. *Tipologiya geosistem Belorusskogo Poles'ya* [Typology of geosystems of the Belarusian Polesie]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya = Journal of the Belarusian State University. Geography. Geology*, 2024, no. 2, pp. 3–23. (in Russian)
6. Ivanov I. V., Zamotaev I. V. Scientific ideas of the soil scientist and geographer V. M. Fridland, their origins and development (on the 100th anniversary of his birth). *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V. V. Dokuchaeva = Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, no. 101, pp. 202–219. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-202-219. (in Russian)
7. Romanova T. A., Shal'kevich F. E. *Tipologiya zemel' pojmy r. Pripyati po materialam aerofotos'emki* [Typology of the Pripyat River floodplain based on aerial photography], *Pochvovedenie = Soil Science*, 1985, no. 1, pp. 5–14. (in Russian)
8. *Aerokosmicheskie metody v pochvovedenii i ih ispol'zovanie v sel'skom hozyajstve* [Aerospace methods in soil science and their use in agriculture]. Moscow, Science Publ., 1990, 247 p. (in Russian)
9. Kachkov Yu. P., Shal'kevich F. E., Lepeshev A. A., Panasyuk O. Yu. *Distancionnoe zondirovanie pochvennogo pokrova Belarusi* [Remote sensing of the soil cover of Belarus]. *Pochvovedenie i agrohimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2008, no. 1, pp. 33–40. (in Russian)
10. Steczko V. V., Rzhetskaya G. A. *Gidrogeologicheskie i geomorfologicheskie usloviya formirovaniya struktury pochvennogo pokrova Pripyatskogo Poles'ya* [Hydrogeological and geomorphological conditions of formation of the structure of the soil cover of the Pripyat Polesie]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta imeni V. I. Lenina. Serya 2, Himiya. Biologiya. Geografiya = Bulletin of the Belarusian State University named after V. I. Lenin. Series 2, Chemistry. Biology. Geography*, 1982, no. 1, pp. 59–64. (in Russian)
11. Shal'kevich F. E., Kachkov Yu. P., Topaz A. A. *Agroekologicheskoe mikrorajonirovanie pochv r. Pripyat' na osnove metodov distancionnogo zondirovaniya* [Agroecological microzoning of soils of the Pripyat River based on remote sensing methods]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Serya 2, Himiya. Biologiya. Geografiya = Bulletin of the Belarusian State University. Series 2, Chemistry. Biology. Geography*, 1999, no. 3, pp. 61–66. (in Russian)
12. Topaz A. A. *Analiz struktury pochvennogo pokrova na osnove cifrovoj obrabotki aerofotosnimkov (na primere doliny r. Pripyat')* [Analysis of the structure of the soil cover based on digital processing of aerial photographs (using the Pripyat River valley as an example)]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Serya 2, Himiya. Biologiya. Geografiya = Bulletin of the Belarusian State University. Series 2, Chemistry. Biology. Geography*, 2006, no. 1, pp. 74–78. (in Russian)
13. Kur'yanovich M. F. *Kartografirovanie neodnorodnosti pochvennogo pokrova osushennykh zemel' Belorusskogo Poles'ya na osnove materialov distancionnogo zondirovaniya* [Mapping the heterogeneity of the soil cover of drained lands of the Belarusian Polesie based on remote sensing materials]. *Pochvovedenie i agrohimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2013, no. 2, pp. 55–63. (in Russian)

14. Kur'yanovich M. F., Davidovich Yu. S., Shal'kevich F. E. *Ispol'zovanie infrakrasnyh teplovyh kosmicheskikh snimkov dlya izucheniya pochvennogo pokrova* [Using infrared thermal space images to study the soil cover]. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2022, no. 1, pp. 21–31. (in Russian)
15. Grubina P. G., Savin I. Yu., Prudnikova E. Yu. *Vozmozhnosti ispol'zovaniya dannyh teplovoj s'emki dlya detektirovaniya osnovnykh parametrov plodorodiya pahotnykh pochv* [The possibilities of using thermal infrared imaging data for detecting the main parameters of arable soil fertility]. *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V. V. Dokuchaeva = Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, no. 105, pp. 146–172. (in Russian)
16. Chervan A. N., Davidovich Yu. S., Kindeev A. L. Modeling of the 50-year dynamics of the reclaimed lands vulnerability to wind soil erosion in the region of Pripyat Polesye. *Geography, Environment, Sustainability*, 2024, no. 4, pp. 198–204. DOI: 10.24057/2071-9388-2024-3290.
17. Shal'kevich F. E., Davidovich Yu. S., Topaz A. A., Kur'yanovich M. F. *Osobennosti deshifirovaniya pochvenno-rastitel'nogo pokrova tipov zemel' Belorusskogo Poles'ya po materialam radiolokacionnoj s'emki* [Features of decoding the soil and vegetation cover of land types in the Belarusian Polesie based on radar survey materials]. *Zemlya Belarusi = Land of Belarus*, 2023, no. 4, pp. 47–57. (in Russian)
18. Savin I. Yu. *Perspektivy razvitiya kartografirovaniya i monitoringa pochv na osnove interpolyacii tochechnykh dannyh i distancionnykh metodov* [Prospects for the development of soil mapping and monitoring based on interpolation of point data and remote sensing methods]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17, Pochvovedenie = Bulletin of the Moscow University. Series 17, Soil Science*, 2022, no. 2, pp. 13–19. (in Russian)
19. Savin I. Yu., Zhogolev A. V., Prudnikova E. Yu. *Sovremennye trendy i problemy pochvennoj kartografii* [Modern trends and problems of soil mapping]. *Pochvovedenie = Soil Science*, 2019, no. 5, pp. 471–480. DOI: 10.1134/S1064229319050107. (in Russian)
20. Buryak Zh. A., Gafurov A. M. *Ocenka spektral'no-otrazhatel'nykh svoystv erodirovannykh agropochv Respubliki Tatarstan* [Spectral properties of eroded arable soils in the Republic of Tatarstan]. *Regional'nye geosistemy = Regional Geosystems*, 2025, no. 3, pp. 517–532. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-517-532 EDN: OMEKBH. (in Russian)
21. *Nacyyanal'ny atlas Belarusi* [National Atlas of Belarus]. Minsk, Belkartografiya Publ., 2024, 348 p. (in Belarussian)
22. Klebanovich N. V., Anoshko V. S., Chertko N. K., Koval'chik N. V., Cherny'sh A. F. *Geografiya pochv Belarusi: ucheb. posobie* [Soil geography of Belarus: a textbook]. Minsk, BSU Publ., 2011, 183 p. (in Russian)
23. Anoshko V. S., Vashkevich L. F., Bachila S. S., Kudelko D. V., Savriczkaya K. M. *Sovremennoe sostoyanie agrofizicheskikh svoystv meliorirovannykh pochv Belorusskogo Poles'ya* [Current state of agrophysical properties of reclaimed soils of the Belarusian Polesie]. *Struktura i morfogenez pochvennogo pokrova v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 17–20 sent. 2013 g.* [Structure and morphogenesis of the soil cover under anthropogenic impact: Proc. of the International Scientific and Practical Conf., September 17–20, 2013]. Minsk, 2013, pp. 162–165. (in Russian)
24. Romanova T. A., Chervan' A. N., Andreeva V. L. *Teoreticheskie osnovy i prakticheskaya znachimost' issledovaniy struktury pochvennogo pokrova* [Theoretical foundations and practical significance of studies of the structure of the soil cover]. *Pochvovedenie = Soil Science*, 2011, no. 3, pp. 300–310. (in Russian)
25. Smirnova M. A., Gennadiev A. N. *Kolichestvennaya ocenka pochvennogo raznoobraziya: teoriya i metody issledovaniya* [Quantitative assessment of soil diversity: theory and research methods]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya = Bulletin of Moscow University. Series 5, Geography*, 2017, no. 4, pp. 3–11. (in Russian)
26. Godel'man Ya. M. *Metodika opredeleniya sistemy parametrov struktury pochvennogo pokrova* [Methodology for determining the system of parameters of the soil cover structure]. Chisinau, Moldagroinformeklama Publ., 1989, 36 p. (in Russian)
27. Kaurichev I. S., Romanova T. A., Sorokina N. P. *Struktura pochvennogo pokrova i tipizaciya zemel': uchebnoe posobie* [Soil cover structure and land typification: a tutorial]. Moscow, Moscow Agricultural Academy Publ., 1992, 151 p. (in Russian)
28. Savin I. Yu., Berbekov S. A., Tutukova D. A. *Kompleksnaya ocenka neodnorodnosti pochvennogo pokrova v zavisimosti ot sostoyaniya sel'skohozyajstvennykh kul'tur* [Comprehensive assessment of soil heterogeneity by crop canopy status]. *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V. V. Dokuchaeva = Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, no. 113, pp. 31–57. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-113-31-57. (in Russian)
29. Lysenko S. A., Hitrikov M. A. *Ocenki sovremennykh izmenenij bioklimaticheskikh parametrov pochvenno-rastitel'nogo pokrova Gomel'skoj oblasti* [Assessment of modern changes in bioclimatic parameters of soil and vegetation cover of the Gomel region]. *Prirodny'e resursy' = Natural resources*, 2024, no. 2, pp. 17–29. (in Russian)
30. Shal'kevich F. E., Kur'yanovich M. F. *Tematicheskoe deshifirovanie: posobie* [Thematic deciphering: a manual]. Minsk, BSU Publ., 2022, 131 p. (in Russian)
31. Shestakov N. A., Davidovich Yu. S., Kazyak E. V. *Analiz metodov atmosfernoj korrekcii DDZ (na primere snimkov Landsat-8) dlya polucheniya naibolee reprezentativnykh dannyh o spektral'no-otrazhatel'nykh svoystvakh rastitel'nogo pokrova* [Analysis of methods of atmospheric correction of remote sensing data (using Landsat-8 images as an example) to obtain the most representative data on the spectral-reflective properties of vegetation cover]. *GIS-tehnologii v naukah o Zemle: materialy resp. nauch.-prakt. seminar studentov i molodykh uchenykh, Minsk, 17 noyab. 2021 g.* [GIS technologies in Earth sciences: materials of the rep. scientific and practical seminar of students and young scientists, Minsk, November 17, 2021]. Minsk, 2021, pp. 212–220. (in Russian)
32. USGS (2025). Available at: <https://www.usgs.gov/faqs> (accessed 1 October 2025).

33. Cherepanov A. S. *Vegetacionnye indeksy* [Vegetation indices]. *Geomatika = Geomatics*, 2011, no. 2, pp. 98–102. (in Russian)
34. Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Dagurov P. N. *Tekhnologiya sovmestnogo analiza vremennyh ryadov izobrazhenij interferometricheskoy kogerentnosti Sentinel-1 i vegetacionnogo indeksa po dannym Sentinel-2 dlya monitoringa sel'skohozyajstvennyh polej* [Technology of joint analysis of Sentinel-1 interferometric coherence time series and vegetation index based on Sentinel-2 data for monitoring agricultural fields]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 61–72. (in Russian)
35. Davidovich Yu. S. *Metodika tipologicheskogo otbora territorial'nyh edinicz dlya distancionnoj ocenki sostoyaniya geosistem Belorusskogo Poles'ya* [Methodology of typological selection of territorial units for remote assessment of the state of geosystems of the Belarusian Polesie]. *Molodezh' XXI veka: obrazovanie, nauka, innovacii: materialy XI Mezhdunarodnoj konferencii aspirantov i molodyh uchenykh, Vitebsk, 6 dekabrya 2024 g.* [Youth of the XXI century: education, science, innovation: materials of the XI International conference of postgraduate students and young scientists, Vitebsk, December 6, 2024], Vitebsk, 2024, pp. 26–27. (in Russian)
36. Kachkov Yu. P., Bashkinceva O. F., Yaczuho V. M., Cherny'sh A. F. *Tipizaciya zemel' i ispol'zovanie ee rezul'tatov pri formirovanii rabochih uchastkov* [Land typification and the use of its results in the formation of working areas]. *Zemlya Belarusi = Land of Belarus*, 2011, no. 3, pp. 41–48. (in Russian)

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

Davidovich Yuriy Sergeevich – Post-Graduate student of Department of Soil Science and Geoinformatic of the Faculty of Geography and Geoinformatic of the Belarusian State University (16. Lenin-gradskaya Str., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: seg98001@gmail.com

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

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЕКТОВ ВОДООХРАННЫХ ЗОН ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КРУПНЫХ ГОРОДОВ В КОНТЕКСТЕ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ (НА ПРИМЕРЕ г. МИНСКА)

Л. Н. Гертман¹, Н. Н. Шешко², С. И. Кузьмин³

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;

²Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь;

³Берлинский университет имени Александра Гумбольдта, Берлин, Германия

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы научного обоснования организации водоохранных зон и прибрежных полос водных объектов в условиях городских систем. Отражены методические подходы научного обоснования проектов водоохранных зон и на примере г. Минска представлены результаты разработки проекта водоохранных зон водных объектов. По результатам анализа геологического строения, почвенно-геоморфологических и гидрогеологических условий, характера озеленения территории, особенностей городской застройки, функционального использования территории, а также инженерно-технической инфраструктуры и оценки антропогенной нагрузки на водные системы рассчитаны основные параметры водоохранных зон и прибрежных полос водных объектов. Выявлены потенциальные источники загрязнения водных объектов в границах водоохранных зон и прибрежных полос и предложены профилактические мероприятия по благоустройству территории, прилегающей к водному объекту, направленные на регулирование качества водных ресурсов и предотвращение загрязнения поверхностных вод.

Ключевые слова: ресурсы; управление водными ресурсами; менеджмент; водные объекты; экологическое состояние; источники воздействия; водоохранные зоны; прибрежные полосы; природоохранные мероприятия.

Для цитирования. Гертман Л. Н., Шешко Н. Н., Кузьмин С. И. Научное обоснование и разработка проектов водоохранных зон водных объектов крупных городов в контексте управления водными ресурсами (на примере г. Минска) // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 88–99.

SCIENTIFIC SUBSTANTIATION AND DEVELOPMENT OF WATER PROTECTION ZONES PROJECTS FOR WATER BODIES OF CITIES IN THE CONTEXT OF WATER RESOURCES MANAGEMENT (ON THE EXAMPLE OF MINSK)

L. N. Gertman¹, N. N. Sheshko², S. I. Kuz'min³

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus;

²Brest State Technical University, Brest, Belarus;

³Alexander-Lucent-Universität von Humboldt-Universität Berlin, Berlin, Germany

Abstract. The article considers questions of scientific substantiation of organization of water protection zones of water bodies of urban systems. Methodical approaches of scientific substantiation of water protection zones projects are reflected and the results of development of water protection zones of water objects are presented on the example of Minsk. Based on the results of analysis of geological structure, soil-geomorphological and hydrogeological conditions, nature of landscaping of the territory, features of urban development, functional use of the territory, as well as engineering infrastructure and assessment of anthropogenic stress on water systems are calculated the main parameters of water protection zones of water bodies. Potential sources of pollution of water bodies within the boundaries of water protection zones have been identified, and preventive measures to improve the area adjacent to the water body have been proposed, aimed at managing water quality and preventing pollution of surface waters.

Keywords: resources, water resources, management, management, water bodies, ecological status, sources of impact, water protection zones, environmental protection measures.

For citation. Gertman L. N., Sheshko N. N., Kuz'min S. I. Scientific substantiation and development of water protection zones projects for water bodies of cities in the context of water resources management (on the example of Minsk). *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 88–99.

Введение. На протяжении длительного развития человеческого общества вода является основополагающей составляющей существования человеческой жизни. Достаточность водных ресурсов на определенной территории определяет возможность функционирования в ее пределах природных систем и является одним из факторов освоения и экономического развития. Особенно актуальной проблема обеспеченности водными ресурсами и их рационального использования является для городских территорий, в пределах которых сконцентрирована большая часть промышленного производства, а также проживает более половины населения мира [1]. С большей вероятностью можно предположить, что для городов эта проблема будет оставаться одной из важных и в будущем, так как в их пределах, по прогнозам ООН, к 2050 г. ожидается дальнейший рост населения (до 70 %) [2].

Проблема организации эффективного управления водными ресурсами особенно практически востребована для г. Минска, в котором производится более 30 % ВВП страны, расположен ряд крупнейших предприятий, зарегистрировано более 4000 предприятий, занятых в сфере промышленности) и по состоянию на 1 января 2024 г. проживало 1 992 862 человека (21,76 % населения страны) [3, 4]. При этом основная проблема менеджмента сводится к выработке оптимальной системы управления водными ресурсами, которая не только позволила бы учитывать экономические потребности в отношении использования поверхностных и подземных вод, но и обеспечивала в городе и на прилегающей территории развитие ценных экосистем, а также гарантировала сохранение ландшафтного и биологического разнообразия.

Необходимо отметить, что несмотря на то, что г. Минск расположен в умеренной климатической зоне с характерным гумидным климатом, при котором количество выпадающих атмосферных осадков больше, чем может испариться и просочиться в почву, водные ресурсы в Минске и в формирующейся городской агломерации распределены неравномерно и потенциально уязвимы к антропогенному воздействию, что усугубляется современными процессами изменения климата. Историческое расположение большей части г. Минска на возвышенности (преобладают холмистые, хорошо дренированные участки с абсолютными отметками 200–220 м, колебание высот в черте города достигает 100 м), являющейся водоразделом бассейнов Балтийского и Черного морей, было связано с наличием на этой территории рек с относительно бедными ресурсами речного стока, но выгодным транспортным положением («из варяг в греки»). По мере расширения города гидрографическая сеть на территории Минска становилась все более неравномерной. Юго-западная часть города практически лишена водотоков, но имеет много сухих ложбин, в верховьях которых расположены небольшие пруды. Северо-восточная часть Минска представлена пятью водотоками. Основным водотоком города являются р. Свислочь с ее притоками – реками Качинкой, Цной, Лошицей (с Мышкой), Сенницей, Тростянкой, каналом Слепянской водной системы. Питание всех рек на территории города осуществляется, прежде всего, за счет грунтовых вод и атмосферных осадков. На р. Свислочи и ее притоках создан ряд водохранилищ: Чижовское, Цнянское, Лошицкое, Курасовщина, Заславское и Комсомольское озеро. Общая площадь водохранилищ в черте г. Минска и его ближайших окрестностей составляет более 40 км², оказывая влияние на климат тех территорий, которые расположены вблизи водоемов. К основным (систематизирующим) водоемам относятся семь: водохранилища Дрозды, Чижовское (водоем ТЭЦ-3), Цнянское, Комсомольское озеро, пруд Лебяжий, водоемы Курасовщина и ТЭЦ-2.

Вплоть до окончания Второй мировой войны жители города пользовались речной и колодезной водой, водопровод обеспечивал только центральную часть Минска. С резким ростом численности населения города в период с середины 1940-х до 1970-х годов (фактически пятикратное увеличение численности: с довоенных 237,5 тыс. в 1939 г. до 1124,4 тыс. в 1975 г. [5]) и строительством новых крупных промышленных предприятий г. Минск стал испытывать нехватку водных ресурсов как для питьевых, так и для хозяйственных целей. Для решения этой проблемы в 1968 г. было начато строительство канала Вилейско-Минской водной системы протяженностью более 60 км, который официально был введен в эксплуатацию в январе 1976 г. Искусственно созданный гидротехнический комплекс водных объектов, включающий 14 водохранилищ, перебрасывает с помощью ряда насосных станций (высота подъема – 64 м), речной сток из р. Вилии (северо-западная часть страны, бассейн Балтийского моря) в р. Свислочь (соответственно в центральную и южную часть Беларуси, бассейн Черного моря). Часть поверхностных вод из Вилейского водохранилища после прохождения их полного цикла очистки до сих пор используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения, а также для производственных целей и обеспечения обводнения главной реки г. Минска – Свислочи. С вводом в эксплуатацию искусственного гидротехнического комплекса доля поверхностных источников воды в системе хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Минска стала составлять значительную часть (к примеру, еще в 2013 г. она равнялась 40 % [6]).

В то же время итоги оценки данных наблюдений за состоянием поверхностных и подземных вод в составе Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь [7, 8], результатов отдельных исследований безопасности и безвредности воды поверхностных водных объектов для культурно-бытового (рекреационного) использования [9, 10], данных из материалов, характеризующих водные ресурсы и антропогенную нагрузку на поверхностные объекты и подземные источники Республики Беларусь (по количеству сточных вод и загрязняющим веществам) [11],

указывают на то, что охрана вод от их загрязнения (по санитарно-эпидемиологическим гидрохимическим и гидробиологическим показателям) [12] и обеспечение «равноправного доступа населения к качественной питьевой воде и надлежащим услугам в области водоснабжения и водоотведения», а также «улучшения экологического состояния (статуса) поверхностных водных объектов с предупреждением их загрязнения, засорения и истощения» [13] и далее будут оставаться одними из приоритетных задач для органов управления, принимающих решения в области менеджмента водными ресурсами (на их решение, к примеру, направлены мероприятия, реализуемые в рамках подпрограммы «Чистая вода» Государственной программы по стопроцентному переводу в г. Минске до конца 2025 г. всех источников хозяйственно-питьевого водоснабжения на подземные артезианские источники [14]).

В соответствии с требованиями Водного кодекса Республики Беларусь от 30 апреля 2014 г. № 149-З для охраны поверхностных вод от загрязнения и для рационального их использования должны быть разработаны и утверждены проекты водоохранных зон (далее – ВЗ) и прибрежных полос (далее – ПП) водных объектов, в пределах которых должен соблюдаться специальный режим ведения хозяйственной деятельности [15]. Требования по разработке границ ВЗ водных объектов предусматривают проведение большого объема наукоемких работ, в результате которых устанавливается прилегающая к поверхностному водному объекту территория, где необходимо поддерживать специальный режим хозяйственной деятельности, предотвращающий их загрязнение и засорение. В свою очередь, ПП является частью водоохранной зоны, непосредственно примыкающей к поверхностному водному объекту, на которой устанавливаются более строгие требования к деятельности, чем на всей территории ВЗ. Разработанные таким образом ВЗ и ПП для поверхностных водных объектов служат достаточно эффективным организационным мероприятием, направленным на предотвращение загрязнения и истощения водных объектов.

Представленные в данной статье результаты, выводы и предложения основываются на многолетнем практическом опыте участия ее авторов в обосновании ВЗ и ПП водных объектов в Республике Беларусь и непосредственно на результатах научно-исследовательских работ по разработке (2017 г.) и последующей корректировке (2021–2022 гг.) разработанных проектов ВЗ водных объектов г. Минска (заказчик научных проектов – Минский городской исполнительный комитет).

Цель работы – выполнить научное обоснование размещения границ ВЗ и ПП водных объектов в условиях г. Минска и разработать мероприятия в границах предлагаемых ВЗ и ПП, направленных на предотвращение загрязнения поверхностных вод и охрану водных объектов.

Объектом исследований выступали водные объекты, расположенные в пределах черты г. Минска.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- анализ уровня антропогенного воздействия и характера землепользования исследуемой территории;
- сбор и систематизация данных о поверхностных водных объектах и гидрологических характеристиках водных объектов, а также сведений и материалов, характеризующих существующие природные условия (в том числе рельеф местности и почвы), характер землепользования в границах территории исследований;
- анализ функционального использования и уровня инженерно-технической инфраструктуры исследуемой территории;
- обследование объектов, оказывающих вредное воздействие на поверхностные водные объекты, и разработка перечня точечных и диффузных источников загрязнения поверхностных водных объектов;
- анализ уровня антропогенного воздействия и характера землепользования исследуемой территории;
- научное обоснование устанавливаемых границ ВЗ и ПП для каждого объекта в пределах исследуемой территории;
- разработка предложений по ведению режимов хозяйственной и иной деятельности в границах предлагаемых ВЗ и ПП отдельно для каждого исследуемого водного объекта;
- разработка перечня основных природоохранных мероприятий, направленных на регулирование качества водных ресурсов, предотвращения загрязнения и засорения, а также охрану водного объекта;
- разработка комплексного научно обоснованного проекта ВЗ водных объектов г. Минска.

Научные исследования включали подготовительный, полевой и камеральный этапы.

На подготовительном этапе производились подбор и приобретение необходимых планово-картографических материалов; выполнялись сбор и систематизация данных о гидрологических характеристиках поверхностных водных объектов (в том числе водосборной площади водных объектов), об их целевом использовании, экологическом состоянии исследуемых водных объектов и источниках загрязнения поверхностных вод, а также сведений и материалов, характеризующих существующие природные условия, в том числе рельеф местности, характер функционального использования и сведений об уровне инженерно-технической инфраструктуры исследуемой территории.

При проведении полевого этапа на местности уточнялись некоторые морфометрические характеристики самих водных объектов, а также обследовались объекты, которые оказывают или потенциально могли бы оказывать вредное воздействие на поверхностные водные объекты.

Камеральный этап являлся наиболее трудоемким и включал обработку, анализ и оценку подобранных картографических и статистических материалов, результатов выполненных полевых исследований; разработку перечня точечных и диффузных источников загрязнения поверхностных водных объектов с проведением анализа уровня антропогенного воздействия и характера землепользования исследуемой территории; научное обоснование устанавливаемых границ ВЗ и ПП; нанесение на планово-картографические материалы ВЗ и ПП; разработку мероприятий, направленных на охрану поверхностных водных объектов; разработку комплексного научно обоснованного проекта водоохранных зон водных объектов г. Минска (более детальный состав работ и некоторые особенности их проведения представлены нами в статьях [16, 17]).

В качестве основных методов исследований применялись экспедиционно-полевой, статистической обработки данных, картографический, моделирования, сравнительно-географический, экспертных оценок. При обработке данных на каждом из этапов проведения работ нами использовались современные технологии ГИС (следует отметить, что нормативными документами Республики Беларусь использование ГИС-технологий при разработке проектов водоохранных зон водных объектов является обязательным требованием [18]). Результаты практического опыта подготовки проектов ВЗ водных объектов подтверждают, что ГИС-технологии как инструмент позволяют интегрировать географические данные в единый информационный ресурс и в целом их использование значительно улучшает качество проекта ВЗ, позволяя не только экономить время и ресурсы на выполнение исследований, но и принимать более обоснованные решения (см. также [19, 20]).

Основой для научного обоснования и разработки проектов ВЗ и ПП г. Минска являлась земельно-информационная система Республики Беларусь (далее – ЗИС), которая включает информацию о земельных участках, их границах и административно-территориальной принадлежности, распределении земель по категориям и видам прав на землю, землевладельцах и землепользователях, видах земель (земельное покрытие) и их мелиоративном состоянии, ограничениях землепользования, текущих изменениях в составе и распределении земель, элементы топографического содержания.

Данные ЗИС использовались как на подготовительном этапе для сбора и анализа картографической информации, так и для анализа функционального использования исследуемой территории, определения возможных источников загрязнения, их отдельных характеристик. Применение ГИС-технологий при разработке проектов ВЗ и ПП позволило обеспечить комплексный подход к оценке состояния природной среды непосредственно на рассматриваемой территории расположения водного объекта с учетом как особенностей формирования его стока, так и потенциального воздействия источников загрязнения. Использование данных дистанционного зондирования земли для целей обоснования границ ВЗ и ПП позволило учесть существующее состояние водосборной территории и разработать необходимые мероприятия для предотвращения негативных последствий хозяйственной деятельности и снижения антропогенной нагрузки на поверхностные водные объекты.

Результаты и их обсуждение. В результате выполнения исследований на начальном этапе определен список водотоков и водоемов г. Минска, для которых установление ВЗ и ПП является необходимым условием их нормального функционирования в городских условиях и для которых ВЗ и ПП должны быть разработаны в соответствии с требованиями национального природоохранного законодательства. При обосновании перечня водных объектов учтены такие факторы, как характер современного использования рек и водоемов и прилегающих к ним территорий; экологическое и техническое значение для экосистемы и городской среды водного объекта и прилегающих к нему территорий; наличие/отсутствие в зоне размещения водных объектов источников загрязнения.

В перечень объектов, для которых разрабатывались ВЗ и ПП, было включено восемь основных водотоков (главная водная артерия города – р. Свислочь и ее притоки (сверху вниз по течению) – Цна, Лошица (с Мышкой), канал Слепянской водной системы, Тростянка, Качинка и Сенница) и десять основных водоемов (водохранилище Дрозды, пруд Лебяжий, Комсомольское озеро, водоем ТЭЦ-2, Чижовское водохранилище (водоем ТЭЦ-3), водоем Курасовщина, водоем в низовьях р. Лошицы и Цнянское водохранилище, пруд без названия в районе ул. Семашко – ул. Каролинской, пруд без названия в районе ул. Горького) [21].

Основным водотоком г. Минска является р. Свислочь, в водосборе которой расположены дренирующие территорию города притоки. Свое начало река берет в Минском районе и впадает в р. Березину (см. рис. 1). Общая ее длина составляет 297 км, площадь водосбора – 5160 км². Гидрографическая сеть насчитывает свыше 360 водотоков (длиной более 1 км), общей протяженностью около 1630 км. Кроме того, свыше 2120 км приходится на осушительные каналы и канавы. Густота гидрографической сети составляет 0,32 км/км², с учетом осушительной сети – 0,41 км/км² (см. рис. 1). Входящим створом в пределах современной городской черты является место пересечения Минской кольцевой автодороги (далее – МКАД) и водохранилища Дрозды, замыкающим – д. Новый Двор.

Длина реки на данном участке – 45 км, площадь водосбора – 430 км². Русло реки извилистое, неразветвленное, шириной 15–30 м, на расширениях – до 60 м. Преобладающие глубины по фарватеру составляют 1,5–2,0 м, скорость течения по стрежню – 0,2–0,5 м/с. Дно песчаное, у берегов заиленное (берега на значительном протяжении обустроены). Пойма шириной от 50 до 500 м ровная, луговая, хорошо выработана, чередующаяся по берегам, ввиду регулирования стока не затопляется. В пределах современной городской черты на р. Свислочи расположены водоемы: водохранилище Дрозды (нижний плёс), Комсомольское озеро (водоем ТЭЦ-2), Чижовское водохранилище (водоем ТЭЦ-3).

Морфометрические параметры основных водоемов представлены в табл. 1. Из всех водоемов самым большим по площади является водохранилище Дрозды, построенное на р. Свислочи для технического водоснабжения и водного благоустройства г. Минска, рекреации. МКАД, по которой проходит современная и перспективная границы города, разделяет водоем на два плёса. Площадь зеркала – 2,4 км² (в том числе в пределах города – 1,5 км²), длина – 6,0 км (в пределах города – 3,1 км), максимальная ширина – 600 м. Наибольшая глубина приурочена к городской территории – 5,5 м, средняя глубина всего водоема – 2,6 м. Ширина: максимальная – 0,6 км, средняя – 0,4 км. Длина береговой линии – 13 км. Объем воды: полный – 6,2 млн м³, полезный – 5,8 млн м³. Площадь водосбора в створе плотины – 649 км². Среднегогодовой сток – 130 млн м³. Прилегающая территория используется в основном как зеленая зона, на южном берегу представлена усадебной застройкой.

Таблица 1. Морфометрические параметры основных водоемов г. Минска

Table 1. Morphometric parameters of the main water bodies of Minsk

Номер на карте	Название и местоположение	Тип	Площадь зеркала, га	Длина, м	Ширина, м	
					средняя	максимальная
1	Водохранилище Дрозды, всего В том числе в пределах городской черты (ниже МКАД)	Русловой	240	6000	400	600
			150	3100	480	600
2	Пруд «Лебяжий»	Пойменный	15,3	650	235	350
3	Комсомольское озеро	Русловой	42	2200	190	350
4	Водоем ТЭЦ-2	Русловой	30	5000	60	300
5	Водохранилище Чижовское	Русловой	160	3500	460	900
6	Водоем Курасовщина, дамба на ул. Брестской, всего В том числе: верхний плёс нижний плёс	Русловой	20,6	1390	145	240
			4,3	320	130	190
			16,3	1100	150	190
7	Пруд, дамба на пер. Чижевских	Русловой	4,0	410	100	110
8	Водохранилище Цнянское	Наливной	90	1500	600	1400
9	Пруд без названия в районе ул. Семашко – ул. Каролинской	Русловой	5,2	600	84,3	90
10	Пруд без названия в районе ул. Горьцкого	Пойменный	5,2	350	109	150

Результаты анализа геоморфологических условий района исследований (приуроченность к Минской краевой ледниковой возвышенности; сильная расчлененность рельефа на отдельные грядово-холмистые массивы; колебания относительных высот территории до 100 м (максимальная абсолютная отметка поверхности – 280,4 м, самые низкие абсолютные отметки поверхности приурочены к пойме р. Свислочи и составляют 180–185 м); наличие техногенных форм рельефа и связанных с ними процессов плоскостной и линейной эрозии; «выработанность» долины р. Свислочи; корытообразный поперечный профиль р. Свислочи; особенности морфометрических характеристик долины р. Свислочи (колебание по бровке от 200 м (ул. Шейпичи) до 1200 м (Чижовское водохранилище); четко выраженная асимметричность долины; относительные превышения бортов долины – 5–25 м; изрезанность долины густой сетью ложбин стока; представленность долины надпойменными террасами, располагающимися на высоте 10–20 м над меженным уровнем воды в реке; изменчивость ширины поймы р. Свислочи от 50 м (на севере участка ниже ул. Аранская и напротив ул. Шейпичи) до 500 м (район Чижовского водохранилища), характер высоты поймы над среднемеженным уровнем – от 0,5 до 1,2 м) позволили выделить отдельные геоморфологические элементы р. Свислочи и ее притоков, наиболее крупных водоемов (бровки долины, поймы, тальвеги), которые впоследствии послужили определяющими природными (геоморфологическими) факторами при установлении границ ВЗ и ПП. Характер антропогенной преобразованности рельефа учтен также при разработке основных предложений по организации водоохранных мероприятий.

Для обоснования границ ВЗ и ПП и разработки соответствующих природоохранных мероприятий выполнен анализ геологического строения и гидрогеологических условий исследуемой территории. С поверхности она перекрыта мощным чехлом осадочных отложений (до 360 м, ниже которых залегает кровля кристаллических пород фундамента). Сверху вниз осадочные породы представлены отложениями четвертичного возраста, испытывающими наибольшее техногенное воздействие (мощность четвертичных отложений изменяется от 100 м на северо-западе до 160 м на юго-востоке г. Минска). В осадочных отложениях представлены голоценовые техногенные образования, голоценовые болотные и аллювиальные отложения, верхнеплейстоценовые-голоценовые, делювиально-пролювиальные, поозерские аллювиальные отложения, флювиогляциальные и моренные отложения сожского ледника. Необходимость проведения анализа геологического строения исследуемой территории объяснялось тем, что именно геологическое строение территории определяет особенности гидрогеологических условий, которые, в свою очередь, повлияли на характер морфологического строения, прежде всего долинных комплексов, а также на строение и водный режим зоны аэрации. В рамках анализа гидрогеологических условий территории г. Минска выделено четыре водоносных горизонта, наиболее взаимосвязанных с поверхностными водами (водоносный голоценовый горизонт болотных и аллювиальных отложений, водоносный сожский надморенный флювиогляциальный горизонт, слабоводоносный локально водоносный сожский моренный горизонт, водоносный локально слабоводоносный краевой сожский горизонт).

Анализ функционального использования территории г. Минска, прилегающей к водным объектам на удалении, как правило, размером не менее 1000 м (для справки: 600 м – базовая минимальная ширина ВЗ для средних рек согласно требованиям Водного кодекса Республики Беларусь) и результаты оценки уровня антропогенной преобразованности исследуемой территории позволили подразделить все земли в этой зоне на две основные группы:

- территории, формирующие загрязнение (площадки промышленных предприятий, строительных организаций, баз, складов, объекты транспорта и связи, территории сельскохозяйственных производственных объектов, многоэтажной и усадебной жилой застройки, объекты непродовольственной сферы, пашни, а также земельные участки без растительности (пески) и другие нарушенные территории);

- территории, выполняющие определенные санирующие и водозащитные функции (леса, кустарники, луга, пастбищные земли, земли под болотами и заболоченные земли, коллективные садово-водческие товарищества).

На этом этапе исследований была составлена предварительная экспликация земель по функциональному использованию водоохранных территорий в пределах проекта ВЗ согласно требованиям [15, 18], пример которой представлен в табл. 2.

Таблица 2. Функциональное использование водоохранных зон и прибрежных полос водных объектов г. Минска

Table 2. Functional use of water bodies and coastal strips of the water bodies of Minsk

Функциональная зона	Площадь, га	
	в границах водоохранной зоны	в границах прибрежной полосы
1. Многоквартирная жилая застройка	569,64	16,115
2. Многоквартирная высокоплотная жилая застройка	599,31	14,328
3. Смешанная жилая застройка	238,131	4,547
4. Усадебная жилая застройка, дачи	203,44	9,608
5. Общественные территории (застройка общественных центров, учебных, лечебно-оздоровительных объектов и др.)	594,394	2,879
6. Производственная территория (промышленная и коммунально-складская застройка)	399,006	5,123
7. Территории инженерно-транспортной инфраструктуры (улицы, железные дороги, объекты внутреннего водного транспорта, гаражи, автостоянки, объекты и коммуникации различных инженерно-технических систем)	471,724	38,952
8. Ландшафтно-рекреационные территории. В том числе: озелененные территории общего пользования (парки, скверы, бульвары, набережные, лесопарки и др.); озелененные территории ограниченного пользования и специального назначения (кладбища, питомники, берегоукрепительные полосы и др.); природные озелененные территории (луга, сенокосы, пастбища, сады, болота и др.)	3909,64	1685,01
9. Территории под поверхностными водными объектами	–	–

Влияние инженерно-технической инфраструктуры (обустроенности территории, прилегающей к рассматриваемым водным объектам) на параметры ВЗ и ПП рассматривалось в комплексе

с функциональным зонированием и уровнем антропогенной нагрузки на долинный комплекс рек и водосборную площадь других водных объектов.

При оценке влияния инженерно-технической инфраструктуры рассмотрены такие инженерные системы, как водоснабжение, бытовая канализация, дождевая канализация. Установлено, что наличие и функционирование сетей городской канализации (хозяйственно-бытовой и дождевой) позволяет в значительной степени уменьшить перечень объектов, которые непосредственно могут негативно воздействовать на состояние водных ресурсов города.

С учетом национальных природоохранных требований к характеру организации хозяйственной деятельности в пределах ВЗ нами был выполнен анализ всех объектов вредного воздействия, расположенных в потенциальных границах ВЗ и ПП водных объектов, на поверхностные водные объекты. Всего определено 143 объекта, которые в той или иной степени могли оказывать негативное воздействие на водные объекты. При оценке негативного воздействия во внимание принимались следующие основные факторы: функциональное назначение объекта, показатели его деятельности и влияние на водный объект, соответствие реализуемой деятельности установленным (разрешенным) режимам осуществления хозяйственной и иной деятельности в границах ВЗ и ПП согласно национальным природоохранным требованиям, а также реализация/отсутствие природоохранных мероприятий, предотвращающих загрязнения, засорение и истощение вод. В результате экспертного анализа установлено, что подавляющая часть объектов – потенциальных источников загрязнения поверхностных вод, подключены к системе хозяйственно-бытовой канализации г. Минска и существенный вклад в загрязнение поверхностных вод в городе оказывается через поступление загрязняющих веществ через выпуски дождевой канализации (прежде всего, это объекты автомобильного транспорта, включая стоянки и парковки).

Практическая разработка проектов ВЗ водных объектов была осуществлена с применением ГИС-технологий. На основе цифровых моделей рельефа, соответствующих масштабам 1 : 10 000 и 1 : 2000, были определены водосборы водных объектов и территории, с которых потенциально возможно поступление загрязнения с поверхностным стоком в исследуемые водные объекты. Определенные первоначально границы водосборов совместили с закрепленными законодательно требованиями к размерам ВЗ и ПП для средних/малых рек и водоемов: ВЗ – 600/500 м, ПП – 100/50 м и соответственно 500 и 50 м. Далее границы ВЗ и ПП были уточнены на основе функционального, ландшафтно-гидрологического зонирования территории. В них включаются участки, с которых осуществляется поверхностный сток (в том числе загрязняющих веществ), а также территория, затапливаемая в период половодий и паводков (в том числе участки высокой, притеррасной поймы). Необходимо отметить, что границы ВЗ и ПП, как правило, совмещаются с естественными и искусственными рубежами или препятствиями, перехватывающими частично поверхностный сток вышележащих территорий (бровки речных долин, балки, дорожно-транспортная сеть, квартальная застройка, границы землепользователей). Непосредственно ширина ВЗ определялась длиной пути, на котором происходила инфильтрация воды, поступающей в водный объект, и площадью поверхностного стока. Учитывались особенности почвенного покрова, в частности тип почвы и гранулометрический состав, определяющие сорбционную способность почв, и, соответственно, способность фильтровать сток. Во внимание также принимался эрозионный потенциал исследуемой территории. При обратном либо нулевом уклоне ширина ВЗ и ПП корректировалась с минимальной шириной, определенной в законодательстве, или меньшей (в случае наличия соответствующего научного обоснования для конкретного участка). При определении границ ПП также учитывался гранулометрический (механический) состав почв: на песчаных и супесчаных породах ширина ПП имеет минимальные значения, при наличии суглинистых и глинистых пород она может быть увеличена.

При разработке проектов ВЗ водных объектов г. Минска предлагаемая ВЗ дифференцировалась на участки, в разной степени выполняющие стокорегулирующую, водоохранную и средозащитную функции. Стокорегулирующая функция природных комплексов проявлялась в перераспределении суммарного стока по гидрологическим периодам (увеличение в межень, сокращение в половодье и паводки). Водоохранная функция заключалась в улучшении качества вод (их химических и физических свойств) за счет осаднения, накопления и фильтрации загрязняющих веществ в ландшафтах. Средозащитная значимость прибрежных комплексов проявлялась, прежде всего, в их противоэрозионных свойствах.

Для участков с преобладанием естественной растительности характер растительного покрова учитывался исходя из способности растительности фильтровать поверхностный сток, противостоять развитию эрозионных форм. На луговых землях ширина ВЗ устанавливалась исходя из особенностей рельефа, но не менее установленных законодательством пределов; участки под древесно-кустарниковой растительностью в меньшей степени подвергались эрозионным процессам, являлись барьерами для поверхностного стока, что позволяло корректировать границы ВЗ и ПП в сторону уменьшения. На заболоченных участках границы водоохраных территорий, как правило, совпадали с ландшафтными границами данных биотопов.

Примеры разработанных таким образом проектов ВЗ и ПП водных объектов г. Минска представлены на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Водоохранная зона р. Свислочь

Fig. 1. Water protection zone of the Svisloch River

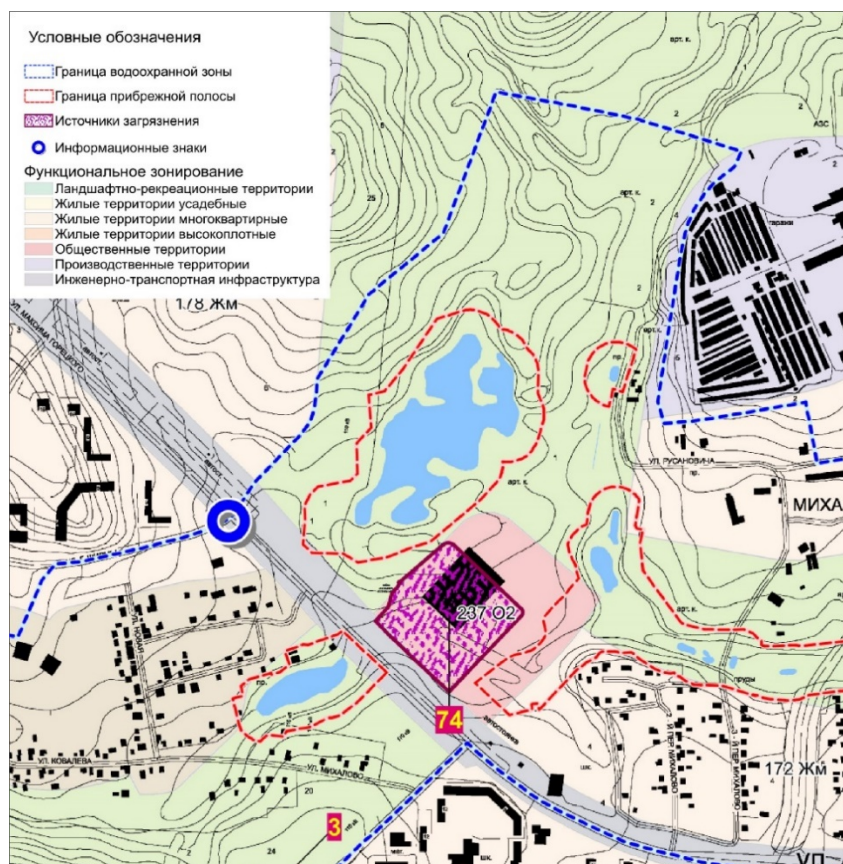


Рис. 2. Водоохранная зона пруда без названия в районе ул. Горецкого – ул. Русановича

Fig. 2. Water protection zone of pond in the area of Goretskogo Str. and Rusanovicha Str.

Главные параметры ВЗ и ПП основных поверхностных водных объектов г. Минска представлены в табл. 3.

Таблица 3. Главные параметры водоохранных зон и прибрежных полос основных поверхностных водных объектов г. Минска

Table 3. Main parameters of water protection zones and coastal strips of the basic surface water bodies of Minsk

Водный объект	Ширина водоохранной зоны, м		Ширина прибрежной полосы, м	
	максимальная	минимальная	максимальная	минимальная
1. Река Свислочь	850	110	200	0
2. Река Лошица	740	50	100	15
3. Река Мышка	550	120	90	20
4. Река Цна	500	100	50	5
5. Река Тростянка	450	190	100	15
6. Река Сенница	420	100	50	50
7. Река Качинка	730	320	110	10
8. Канал Слепянской водной системы	310	0	50	0
9. Цнянское водохранилище	620	40	80	30
10. Пруд без названия в районе ул. Горецкого – ул. Русановича	630	150	110	30

В качестве основных природоохранных мероприятий (в границах ВЗ и ПП, особенно в условиях интенсивно застроенной территории), позволяющих регулировать качество водных ресурсов, предотвращать загрязнение и засорение, было рекомендовано реализовывать следующие мероприятия по благоустройству прилегающей к водному объекту территории: в обязательном порядке должно иметься твердое дорожное покрытие, предотвращающее загрязнение почв и объектов растительного мира; прилегающая территория должна быть окошена; должны быть предусмотрены площадки сбора твердых коммунальных отходов; проезжие дороги должны быть заасфальтированы; должно быть произведено ограждение земельных участков на расстоянии не менее 5 м по горизонтали от береговой линии; должно быть предусмотрено устройство дождевой канализации с устройством локальных очистных сооружений с недопущением сброса всех видов сточных вод на рельеф местности (овраги, карьеры, балки), а также на избыточно увлажненные территории (болота); для всех объектов должны соблюдаться нормативы озелененности территорий.

При размещении новых и реконструкции существующих автомобильных стоянок и автомобильных парковок при общей вместимости 25 машиномест и более рекомендовано предусмотреть строительство очистных сооружений дождевой канализации.

При наличии внеплощадочных сетей дождевой канализации, оборудованных очистными сооружениями, допускается отведение поверхностных сточных вод от парковок без устройства очистных сооружений дождевой канализации при выполнении условий приема сточных вод и согласования с владельцем внеплощадочных сетей дождевой канализации.

Промышленные и сельскохозяйственные объекты, расположенные в ВЗ, в обязательном порядке должны быть оснащены централизованной системой канализации или водонепроницаемыми выгребными, другими устройствами, обеспечивающими предотвращение загрязнения и засорения вод, с организованным подъездом для вывоза содержимого этих устройств.

Заключение. Таким образом, результаты исследования позволили выполнить научное обоснование размещения границ водоохранных зон и прибрежных полос водных объектов в условиях городских территорий (на примере г. Минска). Данные результаты направлены на охрану водных ресурсов в условиях интенсивной антропогенной нагрузки на природную среду и ее предотвращение от трансформации в результате развития городских систем. Полученные результаты внедрены в практику городского планирования г. Минска при организации деятельности на территориях, прилегающих к водным объектам города, для обоснования принятых в Генеральном плане решений по перспективному развитию города, а также используются городскими экологическими службами в качестве информационного обеспечения принятия ими решений по управлению водными ресурсами.

Список использованных источников

1. World Urban Population. – URL: <https://www.worldometers.info/demographics/world-demographics/#urb/> (date of access: 28.02.2025).
2. Urban kaleidoscopes. Cities are mirrors of global resilience. – URL: <https://www.undp.org/urban-kaleidoscopes/> (date of access: 28.02.2025).

3. Основные социально-экономические показатели по Республике Беларусь. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/osnovnye-pokazateli-po-respublike-belarus/> (дата обращения: 28.02.2025).
4. Демографическая и социальная статистика. – URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/solialnaya-sfera/> (дата обращения: 28.02.2025).
5. Демографический ежегодник Республики Беларусь. – Минск : Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2018. – 33 с.
6. Фактическое водопользование и отведение сточных вод в Республике Беларусь (за 2013 г.) : информ. отчет / РУП «ЦНИИКИВР». – Минск, 2014.
7. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь : результаты наблюдений, 2012 / под общ. ред. С. И. Кузьмина. – Электронные, текстовые, графические данные (173 Мб). – Минск : РУП «БелНИЦ «Экология», 2013. – URL: <http://www.nsmos.by/content/660.html> (дата обращения: 28.02.2025).
8. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь : результаты наблюдений, 2023 / Мин-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь. – Минск : Белгидромет, 2024. – URL: <https://www.nsmos.by/publikacii/2023/> (дата обращения: 28.02.2025).
9. Кузьмин, С. И. Геоэкологическая оценка состояния городских водных объектов для целей их рекреационного использования (на примере оз. Святое) / С. И. Кузьмин, Б. В. Адамович, Л. Н. Гертман // Социально-экономическая география в XXI веке: новые реалии и практические возможности : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19–20 нояб. 2021 г. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: Е. А. Антипова (гл. ред.), А. П. Безрученко, А. В. Дыдышко. – Минск : БГУ, 2022. – С. 273–278. – EDN CUMOXI.
10. Овчарова, Е. П. Малые водные объекты г. Минска: гидрохимическая трансформация и эколого-рекреационная значимость / Е. П. Овчарова, Е. В. Санец, Г. М. Бокая // Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий : материалы II Междунар. науч. конф., Респ. Беларусь, Минск, 16 февр. 2021 г. / Бел. гос. ун-т ; редкол.: О. В. Лукашёв (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2021. – С. 258–262. – URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/273235/> (дата обращения: 28.02.2025).
11. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2023 год) : изд. офиц. за 2023 г. – Минск : РУП «ЦНИИКИВР», 2024. – 145 с.
12. Стратегия устойчивого развития Беларуси: экологический аспект / Е. А. Антипова, С. И. Кузьмин [и др.]. – Минск : ФУАинформ, 2014. – 336 с.
13. 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. – URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/blr212334.pdf> (дата обращения: 28.02.2025).
14. О государственной программе «Комфортное жильё и благоприятная среда» на 2021–2025 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 28 янв. 2021 г. № 50 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100050> (дата обращения: 28.02.2025).
15. Водный кодекс Республики Беларусь от 30 апреля 2014 г. № 149-З : принят Палатой представителей 2 апр. 2014 г. : одобр. Советом Респ. 11 апр. 2014 г. / ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Национальный центр правовой информации Республика Беларусь. – Минск, 2018.
16. Гертман, Л. Н. Из опыта разработки проектов водоохранных зон и прибрежных полос в соответствии с действующим законодательством / Л. Н. Гертман, И. Ю. Буко, А. П. Шариков // Земля Беларуси. – 2018. – № 1. – С. 45–48.
17. Гертман, Л. Н. Из опыта разработки проектов водоохранных зон и прибрежных полос в соответствии с действующим законодательством / Л. Н. Гертман, И. Ю. Буко, А. П. Шариков // Земля Беларуси. – 2018. – № 2. – С. 20–23.
18. О требованиях к разработке проектов водоохранных зон и прибрежных полос : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 4 мая 2015 г. № 18 : с изм. от 17 марта 2017 г. № 9 // Право Беларуси. – URL: <http://www.lawbelarus.com/005048/> (дата обращения: 28.02.2025).
19. Гертман, Л. Н. Применение ГИС-технологий при установлении водоохранных зон водных объектов / Л. Н. Гертман, А. А. Сазонов, Ю. А. Мажайский // Современные географические исследования: теория, практика, инновация : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Самарканд, 12–13 мая 2023 г. – Самарканд, 2023. – Ч. II. – С. 44–49.
20. Совершенствование методических подходов, технических решений и обеспечение доступности информации при установлении водоохранных зон водных объектов. / Л. Н. Гертман, Е. В. Левачёв, А. Н. Глинская [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест, 2021. – С. 85–89.
21. Проект водоохранных зон и прибрежных полос поверхностных водных объектов города Минска (внесение изменений) : отчет о НИР // Брест. гос. техн. ун-т. – Брест, 2022. – 29 с.

References

1. World Urban Population. Available at: <https://www.worldometers.info/demographics/world-demographics/#urb/> (accessed February 28, 2025).
2. Urban kaleidoscopes. Cities are mirrors of global resilience. Available at: <https://www.undp.org/urban-kaleidoscopes/> (accessed February 28, 2025).

3. *Osnovnye sotsialno-ekonomicheskie pokazately po Respublike Belarus* [Main socio-economic indicators for the Republic of Belarus]. Available at: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/osnovnye-pokazately-po-respublike-belarus/> (accessed February 28, 2025). (in Russian)
4. *Demograficheskaya i socialnaya statistika* [Demographic and social statistics]. Available at: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/socialnaya-sfera/> (accessed February 28, 2025). (in Russian)
5. *Demografocheskiy ezhegodnik Respubliki Belarus* [Demographic Yearbook of the Republic of Belarus]. Minsk, National Statistical Committee of the Republic of Belarus Publ., 2018, 33 p. (in Russian)
6. *Informatsionnyi otchet "Fakticheskoe vodopolzovanie i otvedenie stochnykh vod (za 2013 god)* [Information report "Actual water use and wastewater disposal in the Republic of Belarus (for 2013)"]. Minsk, RUE "CRICUWR" Publ., 2014. (in Russian)
7. *Natsionalnaya sistema monitoring okruzhauschei sredy Respubliki Belarus: rezultaty nabludeniy, 2012* [National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus: Observation results, 2012]. [Design of turbo-generators]. Minsk, RUE "BelNICekologia" Publ., 2013. Available at: <http://www.nsmos.by/content/660.html> (accessed February 28, 2025). (in Russian)
8. *Natsionalnaya Sistema monitoring okruzhauschei sredy Respubliki Belarus: rezultaty nabludeniy, 2023* (National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus: Observation results, 2023). Minprirody. Minsk, Belgidromet Publ., 2024. Available at: <https://www.nsmos.by/publikacii/2023/> (accessed February 28, 2025). (in Russian)
9. Kuz'min S. I., Adamovich B. V., Gertman L. N. *Geoekologicheskaya otsenka sostoyaniya gorodskikh vodnykh ob'ektov dlya tseley ikh rekreatsionnogo ispol'zovaniya (na primere oz. Svyatoe)* [Geoecological assessment of the state of urban water bodies for the purposes of their recreational use (on the example of Lake Svyatoe)]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sotsial'no-ekonomicheskaya geografiya v XXI veke: novye realii i prakticheskie vozmozhnosti"* [Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. "Socio-economic geography in the XXI century: new realities and practical opportunities"]. Minsk, 2022, pp. 273–278. (in Russian)
10. Ovcharova E. P., Sanec E. V., Bokaja G. M. *Malye vodnye ob'ekty g. Minska: gidrohimicheskaya transformatsiya i ekologo-rekreacionnaya znachimost'* [Small water bodies of Minsk: hydrochemical transformation and ecological and recreational significance]. *Problemy regionalnoi geologii zapada Vostochno-Evropeiskoi platformy i smezhnykh territorij. Materialy II Mezhdunar. nauch. conf., Resp. Belarus, Minsk, 16 fevr. 2021 g.* [Problems of Regional Geology of the West of the East European Platform and Adjacent Territories: Proceedings of the II International Scientific Conference, Republic of Belarus, Minsk, February 16, 2021]. Minsk, BGU Publ., 2021, pp. 258–262. Available at: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/273235/> (accessed February 28, 2025). (in Russian)
11. *Gosudarstvennyy vodnyy kadastr. Vodnye resursy, ikh ispol'zovanie i kachestvo vod (za 2023 god)* [State Water Cadastre. Water resources, their use and water quality (for 2023)]. Official publication (for 2023). Minsk, RUE "CNIKIWR" Publ., 2024, 145 p. (in Russian)
12. Antipova E. A., Kuzmin S. I., et al. *Strategiya ustoychivogo razvitiya Belarusi: ekologicheskiy aspekt* [Sustainable Development Strategy of Belarus: environmental aspect]. Minsk, FUAinform Publ., 2014, 336 p. (in Russian)
13. *O Natsional'noy strategii upravleniya vodnymi resursami v usloviyakh izmeneniya klimata na period do 2030 goda* [On the National Strategy for Water Resources Management in a Changing Climate for the period up to 2030]. *Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 22 fevralya 2022 g. no. 91 (2022)* [Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus no. 91 dated February 22, 2022]. Available at: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/blr212334.pdf> (accessed February 28, 2025). (in Russian)
14. *O gosudarstvennoy programme "Komfortnoe zhit'ye i blagopriyatnaya sreda" na 2021–2025 gody* [On the state program "Comfortable housing and a favorable environment" for 2021–2025]. *Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 28 yanvarya 2021 g. no. 50 (2021)* [Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus no. 50 dated January 28, 2021]. *Natsional'nyy pravovoy Internet-portal Respubliki Belarus'* [National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus] Available at: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/blr212334.pdf> (accessed February 28, 2025). (in Russian)
15. *Vodny kodeks Respubliki Belarus' ot 30 aprelya 2014 goda № 149-Z* [Water Code of the Republic of Belarus of April 30, 2014 no. 149-Z]. Minsk, Natsionalnyy centr pravovoy informatsii Respublika Belarus' Publ., 2018. (in Russian)
16. Gertman L. N., Buko I. Yu., Sharikov A. P. *Iz opyta razrabotki proektov vodookhrannykh zon i pribrezhnykh polos v sootvetstvi s deystvuyushchim zakonodatel'stvom* [From the experience of developing projects for water protection zones and coastal strips in accordance with current legislation]. *Zemlya Belarusi = Land of Belarus*, 2018, no. 1, pp. 45–48. (in Russian)
17. Gertman L. N., Buko I. Yu., Sharikov A. P. *Iz opyta razrabotki proektov vodookhrannykh zon i pribrezhnykh polos v sootvetstvi s deystvuyushchim zakonodatel'stvom* [From the experience of developing projects for water protection zones and coastal strips in accordance with current legislation]. *Zemlya Belarusi = Land of Belarus*, 2018, no. 2, pp. 20–23. (in Russian)
18. *O trebovaniyakh k razrabotke proektov vodookhrannykh zon i pribrezhnykh polos* [On the requirements for the development of projects for water protection zones and coastal strips]. *Postanovlenie Ministerstva prirodnnykh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus' ot 4 maya 2015 g., no. 18 (s izm. ot 17.03.2017 no. 9) (2015).* *Pravo Belarusi* [Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus Belarus no. 18 dated May 4, 2015 (as amended. dated March 17, 2017, no. 9)]. *Pravo Belarusi = The Law of Belarus*. Available at: <http://www.lawbelarus.com/005048> (accessed February 28, 2025). (in Russian)

19. Hertman L. N., Sazonov A. A., Mazhayskiy Yu. A. *Primenenie GIS-tekhnologiy pri ustanovlenii vodookhrannykh zon vodnykh obektov* [Application of GIS technologies in establishing water protection zones of water bodies]. *Sovremennyye geograficheskie issledovaniya: teoriya, praktika, innovatsiya* [Modern geographical research: theory, practice, innovation]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of the international scientific-practical conference]. Samarkand, 2023, part II, pp. 44–49. (in Russian)
20. Gertman L. N., Levachev E. V., Glinskaya A. N., Buko I. Yu., Bladyko V. D., Makus' A. Z. *Sovershenstvovanie metodicheskikh podkhodov, tekhnicheskikh resheniy i obespechenie dostupnosti informatsii pri ustanovlenii vodookhrannykh zon vodnykh obektov* [Improving methodological approaches, technical solutions and ensuring information availability when establishing water protection zones for water bodies]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Brest State Technical University*, Brest, 2021, pp. 85–89. (in Russian)
21. *Proekt vodookhrannykh zon i pribrezhnykh polos poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov goroda Minska (vnesenie izmenenij)* [Project of water protection zones and coastal strips of surface water bodies of the city of Minsk (amendments)]. *Otchet o NIR* [Research report]. Brest State Technical University, Brest, 2022, 29 p. (in Russian)

Информация об авторах

Гертман Любовь Николаевна – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: lubov.hertman@yandex.ru

Шешко Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской части Брестского государственного технического университета (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: optimum@tut.by

Кузьмин Савелий Игнатьевич – кандидат географических наук, доцент, научный сотрудник кафедры ландшафтной экологии географического института факультета математики и естественных наук Берлинского университета имени Александра Гумбольдта, (6, Унтер ден Линден, 10099, г. Берлин). E-mail: savelij.kuzmin@geo.hu-berlin.de, kuzminsaveli@gmail.com

Information about the authors

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

Nikolai N. Sheshko – Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Head of the Research Department of the Brest State Technical University (267, Moskovskaya Str., 224017, Brest, Belarus). E-mail: optimum@tut.by

Saveli I. Kuzmin – PhD in Geography, Associate Professor, Scientist of the Department of Landscape Ecology of Geographical Institute of Faculty of Mathematics and Natural Sciences of Alexander Humboldt University of Berlin (6, Unter den Linden, 10099, Berlin). E-mail: savelij.kuzmin@geo.hu-berlin.de, kuzminsaveli@gmail.com

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ
GEOLOGY. MINERALS

УДК 556.38(476)

Поступила в редакцию 23.10.2025

Received 23.10.2025

**ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ
ФОРМИРОВАНИЯ РЕСУРСОВ И КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ****В. И. Пашкевич¹, Е. А. Кухарик¹, А. М. Кухарик¹, К. Ю. Балашов²**¹*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь;*²*Проектное унитарное предприятие «Калийпроект», Солигорск, Беларусь*

Аннотация. В настоящей статье выполнен анализ природных и антропогенных факторов, влияющих на формирование ресурсов и качество подземных вод на территории Беларуси и связанных с ними геоэкологических рисков. К наиболее значимым природным факторам формирования ресурсов подземных вод относятся особенности геологического строения и рельефа земной поверхности, климатические и гидрологические условия. На территории Беларуси величина естественных возобновляемых ресурсов пресных подземных вод составляет 15,9 км³/год (43,56 млн м³/сут). Общий водоотбор подземных вод в настоящее время находится на уровне 2,4–2,5 млн м³/сут. Это свидетельствует о высокой обеспеченности ресурсами пресных подземных вод, как на текущий период, так и на отдаленную перспективу. В последние десятилетия все большее влияние на формирование ресурсов подземных вод оказывают антропогенные факторы, а именно водоотбор подземных вод на групповых водозаборах и одиночных скважинах, водоотлив из карьеров и осушительная мелиорация. Показано, что интенсивная эксплуатация подземных вод приводит к изменению структуры водного баланса на значительных по площади участках, а также к образованию крупных депрессионных воронок до 70 км в поперечнике с понижением уровней подземных вод до 40–60 м в их центральной части.

Охарактеризовано взаимоотношение природных и антропогенных факторов, предопределяющих качество подземных вод на территории Беларуси. Природными факторами обеспечивается формирование мощной толщи (в среднем 250–350 м) пресных подземных вод с относительно невысокой минерализацией – от 15–100 до 300–400 мг/дм³. Антропогенные факторы (промышленное, коммунально-бытовое, сельскохозяйственное, транспортное, радиационное загрязнение, осушительная мелиорация и др.) приводят к существенной трансформации химического состава грунтовых вод, а иногда и более глубокозалегающих напорных подземных вод. Показано, что основными макрокомпонентами антропогенного загрязнения грунтовых вод являются ионы Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺ и др.

Ключевые слова: подземные воды; ресурсы; качество; загрязнение подземных вод; Беларусь.

Для цитирования. Пашкевич В. И., Кухарик Е. А., Кухарик А. М., Балашов К. Ю. Природные и антропогенные факторы формирования ресурсов и качества подземных вод на территории Беларуси // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 100–113.

**NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS
OF THE FORMATION OF GROUNDWATER RESOURCES
AND THEIR QUALITY OF BELARUS****V. I. Pashkevich¹, E. A. Kukharik¹, A. M. Kukharik¹, K. Yu. Balashov²**¹*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;*²*Design Unitary Enterprise “Kaliproekt”, Soligorsk, Belarus*

Abstract. This article contains the analysis of the natural and anthropogenic factors influencing the formation of groundwater resources and their quality in Belarus and the associated geoecological risks. The most significant natural factors in the formation of groundwater resources include the features of the geological structure and relief, climatic and

hydrological conditions. In Belarus, the amount of natural renewable fresh groundwater resources is 15.9 km³/year (43.56 million m³/day). The total groundwater extraction is currently at the level of 2.4–2.5 million m³/day. This indicates a high supply of fresh groundwater resources both for the current period and for the long term. In recent decades, anthropogenic factors have increasingly influenced the formation of groundwater resources, specifically groundwater extraction from group and individual wells, quarry dewatering and drainage reclamation. It has been shown that intensive groundwater exploitation leads to changes in the water balance structure over large areas, the formation of large depressions up to 70 km across with groundwater levels dropping to 40–60 m in their central parts.

The relationship between natural and anthropogenic factors determining groundwater quality in Belarus is characterized. Natural factors ensure the formation of a thick layer (averaging 250–350 m) of fresh groundwater with relatively low mineralization – from 15–100 to 300–400 mg/dm³. Anthropogenic factors (industrial, municipal, agricultural, transport, radiation pollution, drainage reclamation, etc.) lead to significant changes in the chemical composition of groundwater, sometimes even deep-lying one. It has been shown that the main macrocomponents of anthropogenic groundwater pollution are Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺ and etc. ions.

Keywords: groundwater; resources; quality; groundwater pollution; Belarus.

For citation. Pashkevich V. I., Kukharik E. A., Kukharik A. M., Balashov K. Yu. Natural and anthropogenic factors of the formation of groundwater resources and their quality of Belarus. *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 100–113.

Введение. Подземные воды и, прежде всего, воды самой верхней гидродинамической зоны – зоны активного водообмена, содержащей пресные подземные воды, являются важнейшим компонентом геологической среды. Они оказывают прямое или опосредованное влияние на многие другие компоненты окружающей среды, формируя или участвуя в формировании целого ряда весьма существенных геоэкологических рисков для здоровья человека и условий его жизнедеятельности [1].

Беларусь относится к числу тех немногих стран мира, в которых практически все хозяйственно-питьевое водоснабжение базируется на использовании подземных вод. В связи с этим качество пресных подземных вод и количество их ресурсов являются важнейшими составляющими экологической безопасности населения и предпосылкой устойчивого экономического развития страны. Помимо этого, подземные воды оказывают большое влияние на многие другие компоненты окружающей среды, в том числе на условия питания, формирования ресурсов и качества поверхностных вод [2]. В общем речном стоке Беларуси на долю подземных вод приходится 47 %, а в меженные периоды они формируют его практически полностью [3]. На участках неглубокого залегания подземных вод они оказывают решающее влияние на формирование почвенной влажности, степень водообеспечения растительности и условия ее произрастания. Переосушение почв может быть причиной активизации процесса дефляции и возникновения пожаров на торфяниках. Именно подземные воды обуславливают протекание таких современных геологических процессов, как подтопление, заболачивание, суффозия, карстообразование, оползни и др. Все это в совокупности также влияет на формирование благоприятных (комфортных) условий жизнедеятельности человека.

Цель работы – провести анализ природных и антропогенных факторов формирования ресурсов и качества подземных вод на территории Беларуси.

Материалы и методика исследования. При подготовке статьи использованы данные Государственного водного кадастра за 2000–2016 гг. [4–6], фондовые, литературные и авторские материалы гидрогеологических и гидрогеохимических исследований, характеризующие факторы формирования ресурсов и качества подземных вод на территории Беларуси, а также нормативно-правовая документация, регламентирующая качество питьевых вод источников централизованного и нецентрализованного водоснабжения.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим подробно природные и антропогенные факторы, формирующие ресурсы и качество подземных вод на территории Беларуси.

Факторы формирования ресурсов пресных подземных вод. Природные факторы. Природно-климатические условия Беларуси являются благоприятными для формирования на ее территории значительных запасов пресных подземных вод. Большая часть территории страны, за исключением Полесья, находится в зоне избыточного увлажнения с благоприятными условиями инфильтрационного питания. Высокая проницаемость покровных отложений обеспечивает величину инфильтрационного питания водоносных горизонтов зоны активного водообмена, достигающую 10–20 % от количества выпадающих атмосферных осадков [3]. В результате горизонты верхней части зоны активного водообмена на территории Беларуси получают в среднем 16,9 км³/год (46,3 млн м³/сут) инфильтрующихся вод (атмосферных осадков). С учетом подтока подземных вод из более глубоких гидродинамических зон (+0,6 км³/год), а также расходования грунтовых вод на испарение (–1,6 км³/год) *естественные возобновляемые ресурсы пресных подземных вод* на территории страны оцениваются величиной 15,9 км³/год (43,56 млн м³/сут) [3, 4], которая в обобщенном виде отражает естественное питание подземных вод и соответствует объему подземных вод, ежегодно разгружающихся в речную сеть.

Потенциальную возможность использования подземных вод характеризуют прогнозные эксплуатационные ресурсы подземных вод. Их оценивают в зависимости от расхода воды, который может быть

получен водозаборами, расположенными на всей территории конкретного региона. При этом учитывают возможность естественного пополнения подземных вод за счет поверхностных, а также искусственного увеличения питания подземных вод в результате проведения инженерных мероприятий. Прогнозные эксплуатационные ресурсы подземных вод на территории Беларуси оцениваются величиной 18,1 км³/год (49,6 млн м³/сут) [3, 4].

В целом распределение естественных и прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод на территории Беларуси (по административным областям и по речным бассейнам) очень неравномерно и обусловлено характером рельефа, мощностью зоны аэрации, литологическим составом покровных и водовмещающих пород. Большой неоднородностью характеризуется и распределение по площади такого показателя, как отношение величины эксплуатационных ресурсов к естественным, т. е. обеспеченность питанием. Возмощность питания подземных вод (от которых зависят объемы эксплуатационных ресурсов) по площади существенно различаются, поскольку модули первых определяются условиями питания водоносных горизонтов, а модули вторых – аккумулярующими емкостями этих горизонтов и характеристиками их границ [3]. Наименее благоприятные условия для пополнения запасов подземных вод наблюдаются в южной части территории страны, где прогнозные эксплуатационные ресурсы более чем в 1,5 раза превышают естественные, т. е. обеспеченность восполнением за счет последних не превышает 70 % [3]. При недостаточности естественного питания водоотбор может обеспечиваться за счет упругих запасов эксплуатируемых горизонтов или ресурсов, привлекаемых из рек, т. е. за счет поверхностных вод. На участках интенсивной эксплуатации здесь возможно формирование неуставившегося режима фильтрации.

Количество подземных вод и возможность их использования в пределах конкретных месторождений характеризуют *эксплуатационные запасы подземных вод*, которые оцениваются по промышленным (А, В) и перспективным (С₁, С₂) категориям, отражающим степень гидрогеологической разведанности месторождений.

В настоящее время в Беларуси разведано более 240 месторождений подземных вод. Они эксплуатируются групповыми водозаборами, обеспечивающими водоснабжение в основном городов и поселков городского типа. По этим месторождениям утверждены запасы подземных вод и периодически проводится их переоценка. В последние годы активно осуществляется работа по подсчету запасов подземных вод и по одиночным водозаборным скважинам, обеспечивающим водоснабжение многих сельских населенных пунктов и животноводческих ферм. Государственным водным кадастром учтены балансовые эксплуатационные запасы пресных подземных вод в количестве 6,88 млн м³/сут. В целом степень разведанности подземных вод, которая характеризуется отношением утвержденных эксплуатационных запасов к эксплуатационным ресурсам, по состоянию на 1 января 2016 г. составляет 13,0 % [4].

Использование пресных подземных вод для централизованного водоснабжения осуществляется на 177 водозаборах 112 городов, городских поселков и промышленных центров. Общий отбор пресных подземных вод на *водозаборах с утвержденными запасами* в 2016 г. составил 1,34 млн м³/сут. Степень использования разведанных эксплуатационных запасов подземных вод не превышает 22 % [4]. Помимо этого, по данным за разные годы [5, 6], значительных объемов (до 1,1–1,2 млн м³/сут) достигает водоотбор из *неутвержденных запасов*. Таким образом, общий водоотбор может быть оценен величиной 2,4–2,5 млн м³/сут, т. е. около 5 % от прогнозных эксплуатационных ресурсов. Это свидетельствует о высокой обеспеченности Беларуси ресурсами пресных подземных вод, как на текущий период, так и на отдаленную перспективу. Вместе с тем это не исключает актуальности проблем охраны ресурсов и качества подземных вод. Пресные подземные воды относятся к категории *возобновляемых природных ресурсов*. В связи с этим процессы формирования их ресурсов и качества постоянно подвержены влиянию большого числа *природных и антропогенных* факторов.

Наиболее мощным природным фактором, определяющим процессы восполнения ресурсов пресных подземных вод, является *режим выпадения атмосферных осадков, их интенсивности и расхода на испарение*. Наибольшее питание подземных вод имеет место в те периоды года, когда выпадает наибольшее их количество при наименьшем испарении, т. е. осенью и весной, а в некоторые годы и зимой. Размеры же инфильтрационного питания зависят (при равном количестве осадков) от литологического состава пород зоны аэрации, определяющего скорость возможного поглощения атмосферных осадков, а также от глубины залегания подземных вод. Величина инфильтрации (т. е. инфильтрационного восполнения ресурсов подземных вод), а также величина испарения с увеличением глубин залегания зеркала грунтовых вод постепенно уменьшаются. Максимальное испарение из зоны аэрации, величина которого нередко превышает испарение с открытой водной поверхности, наблюдается на тех участках и в те периоды, когда капиллярная кайма, существующая над зеркалом грунтовых вод, достигает земной поверхности. Такая ситуация наблюдается в пределах болот и переувлажненных земель.

При глубинах залегания грунтовых вод свыше 4–5 м испарение с их поверхности становится весьма незначительным. С увеличением глубин залегания зеркала грунтовых вод амплитуда колебания

их уровней затухает, что можно объяснить рассредоточением процесса питания во времени и балансированием его подземным стоком [7]. Объемы инфильтрации атмосферных осадков до грунтовых вод зависят не только от глубин залегания последних, состава пород зоны аэрации и их фильтрационных свойств, но и от ряда других факторов. Существенно влияют на такие объемы морфологическое строение земной поверхности и микрорельеф, определяющие размеры поверхностного стока и поверхностного задерживания влаги, характер растительности, задернованности или распаханности территории, а также интенсивность выпадения осадков.

Результаты многолетних режимных наблюдений, проводившихся на территории Беларуси [8–10], показывают, что наиболее благоприятными периодами для инфильтрационного питания подземных вод являются осенний и весенний сезоны, несмотря на то что летом выпадает значительно большее количество атмосферных осадков. Это связано с тем, что на интенсивность инфильтрационного питания очень большое влияние оказывает *температура воздуха*. Высокие температуры воздуха летом обуславливают интенсивное расходование выпавших атмосферных осадков на испарение, а также транспирацию растительностью. В зимние сезоны в связи с промерзанием почвы и выпадением осадков в виде снега инфильтрационное питание грунтовых вод происходит лишь эпизодически или вовсе отсутствует. В Беларуси зимние сезоны в целом являются малоблагоприятными для питания подземных вод.

Описанные закономерности процессов формирования ресурсов подземных вод под влиянием таких климатических факторов, как количество и режим выпадения атмосферных осадков, а также температура воздуха, в обязательном порядке должны учитываться при разработке долговременных прогнозов состояния подземных вод в связи с возможными климатическими изменениями и обусловленными ими геоэкологическими рисками.

Тенденции изменения процессов формирования ресурсов подземных вод могут быть совершенно разными в зависимости даже от отдельных деталей сценариев развития климатических изменений. Так, в общем сценарии потепления климата исключительно важным является то, к какому сезону будет приурочено повышение температуры воздуха. Если это летние месяцы, то рост температуры повысит испаряемость и неизбежно приведет к сокращению инфильтрационного питания подземных вод, если зимние месяцы – к сокращению времени промерзания почвы и увеличению периода с благоприятными условиями для инфильтрационного питания подземных вод. Положительным фактором при «зимнем» потеплении климата окажется и изменение структуры осадков в зимние месяцы – увеличение количества жидких осадков и сокращение твердых. Таким образом, к числу сезонов, благоприятных для инфильтрационного питания подземных вод (весенний и осенний), может добавиться еще один – зимний. В целом сценарий «зимнего» потепления можно рассматривать в качестве оптимистического для условий формирования ресурсов подземных вод. Все остальные сценарии потепления климата будут в этом отношении негативными.

Реалистичный сценарий прогноза состояния подземных вод в условиях климатических изменений может быть разработан на основе результатов многолетних (охватывающих несколько десятилетий) наблюдений на гидрологических постах, имеющих на территории Беларуси. Эти результаты свидетельствуют о том, что периодам потепления, т. е. увеличения среднегодовых температур воздуха, всегда соответствовало снижение уровней грунтовых вод разной интенсивности. Таким образом, возможное потепление климата в условиях Беларуси с наибольшей вероятностью будет сопровождаться ухудшением условий формирования ресурсов пресных подземных вод. Это выразится в уменьшении инфильтрационного питания грунтовых вод, снижении их уровней и, в целом, в сокращении объема естественных ресурсов пресных подземных вод.

При оценке процессов формирования ресурсов подземных вод необходимо также учитывать сложную структуру гидродинамических потоков в зоне активного водообмена. В условиях Беларуси она в пределах каждого речного бассейна вписывается в известную схему «междуречного потока» [11]. В соответствии с этой схемой на водораздельных пространствах рек в зоне активного водообмена преобладают нисходящие потоки подземных вод. Это так называемые области питания не только грунтовых, но и более глубокозалегающих напорных водоносных горизонтов. Долины рек являются областями их разгрузки. Большинство эрозионных врезов, каковыми являются долины рек, дренируют не только грунтовые воды, но и межпластовые горизонты пресных подземных вод. Такие закономерности прослеживаются при анализе гидродинамических условий в водоносных горизонтах зоны активного водообмена в пределах каждого детально изученного в гидрогеологическом отношении речного бассейна Беларуси [10, 12].

На формирование ресурсов пресных подземных вод помимо природных факторов в последние десятилетия все большее влияние оказывает большая группа *антропогенных факторов*. К их числу в первую очередь следует отнести водоотбор подземных вод на групповых и одиночных водозаборах, водоотлив из карьеров, а также проведение осушительных мелиораций. В настоящее время в Беларуси эксплуатируется более 30 000 водозаборных скважин. Общий водоотбор из них, как отмечалось

ранее, достигает 2,4–2,5 млн м³/сут. На участках сосредоточенного водоотбора (в первую очередь это групповые водозаборы в городах) формируются значительные по размерам депрессионные воронки, которые охватывают не только эксплуатационный горизонт, но и все залегающие выше горизонты, вплоть до грунтовых вод. В окрестностях крупных городов, имеющих несколько водозаборов, депрессионные воронки могут сливаться в одну общую, образуя весьма значительную по размерам мегадепрессию. Так, в районе г. Минска в верхнепротерозойском водоносном комплексе сформировалась депрессионная воронка размером 40 км × 70 км с понижением уровня подземных вод в центральной части до 50–60 м. В вышележащем днепровско-сожском водоносном комплексе здесь также сформировалась депрессионная воронка размером до 40 км в диаметре с понижением уровня подземных вод до 25–30 м [3, 13]. В центральной части воронки произошла сработка и горизонта грунтовых вод, в результате чего сократился, а на некоторых участках и полностью прекратился сток малых рек – притоков р. Свислочи (реки Переспа, Слепянка, Лошица и др.).

Интенсивная эксплуатация водозаборов в г. Гродно привела к формированию в альбско-сеноманском водоносном горизонте депрессионной воронки, диаметр которой достигает 40 км со снижением уровня подземных вод до 25 м. Столь же обширная депрессионная воронка диаметром до 40 км сформировалась в верхнепротерозойском водоносном комплексе в зоне влияния водозаборов г. Барановичи. Понижение уровней подземных вод в ее центре достигает 30–40 м и более. Этой воронке соответствует депрессия в горизонте грунтовых вод с понижениями уровня до 7–11 м [3]. Таким образом, интенсивная эксплуатация подземных вод способна приводить к изменению структуры водного баланса на значительных по площади участках.

В последние два десятилетия в Беларуси отчетливо проявилась тенденция сокращения объема водопотребления как населением, так и промышленностью. Это обусловлено широким внедрением приборного учета потребления воды и постепенным увеличением ее стоимости для потребителей. За период 1996–2016 гг. отбор проб подземных вод на водозаборах с утвержденными запасами сократился с 1,85 до 1,34 млн м³/сут [3, 4]. Как следствие, уменьшается и негативное влияние интенсивного водоотбора на уровенный режим грунтовых и поверхностных вод. В зонах влияния депрессионных воронок групповых водозаборов при уменьшении водоотбора происходит частичное восстановление (подъем) уровней подземных вод. Такие процессы наблюдаются, например, в восточной части водозабора «Новинки», которая находится на территории г. Минска. Во многих его скважинах в последние десятилетия наблюдаются высокие уровни нитратного загрязнения. После того как эти скважины из-за загрязнения выводятся из эксплуатации, происходит постепенный подъем уровней грунтовых вод на прилегающей территории. В районе улиц М. Богдановича – Сурганова – Л. Карастояновой (территория, прилегающая к бывшей Минской болотной опытной станции) такой подъем уровней грунтовых вод в значительной степени осложнил строительство здесь новых жилых домов, в частности не позволил осуществить запланированное сооружение в них подземных гаражей.

В Беларуси к числу антропогенных факторов, оказывающих широкомасштабное воздействие на подземные воды, относится *осушительная мелиорация*. В настоящее время в стране осушено более 3 млн га болот и заболоченных земель, что привело к существенной перестройке процессов формирования режима и баланса подземных вод на мелиорированных землях.

На большей части существующих мелиоративных систем из-за технического несовершенства не удается обеспечивать поддержание оптимальных уровней грунтовых вод и влажности почвы. Как следствие, в Белорусском Полесье в пределах мелиоративных систем пересушено от 20 до 60 % их площади [10]. В маловодные годы снижение уровней грунтовых вод на прилегающей к мелиоративным системам территории в Полесском регионе прослеживается на расстоянии до 3–4 км. В центральных и северных районах Беларуси, где в составе покровных отложений преобладают супеси и суглинки, зона влияния значительно меньше и составляет 0,1–0,8 км [10]. Все это приводит к ухудшению условий ведения на этой территории сельскохозяйственной деятельности, пересыханию колодцев в сельских населенных пунктах и, в целом, обуславливает снижение уровня комфортности и условий жизнедеятельности населения.

Осушительные мелиорации оказывают существенное влияние на формирование *баланса грунтовых вод*. При снижении их среднегодового уровня с глубины от 0,3–0,5 до 1,5–2,0 м происходит резкое сокращение испарения. Инфильтрация начинает преобладать над испарением, а боковой отток – над притоком. Это приводит к формированию слоя подземного стока, величина которого в песчаных отложениях (именно они преобладают в Белорусском Полесье в составе покровных отложений) может достигать 100–130 мм. Происходит усиление подземного стока в реки и водность возрастает. В то же время почвы в пределах таких мелиоративных систем испытывают острый дефицит влаги [10].

Несколько иначе баланс грунтовых вод трансформируется при осушении земель с преобладанием в составе покровных отложений супесей и суглинков. Здесь снижение уровней приводит лишь к незначительному увеличению инфильтрационного питания грунтовых вод и, как следствие, небольшому

увеличению бокового оттока грунтовых вод. Подземный сток в реки на мелиорированных водосборах с преобладанием супесчаных и суглинистых отложений возрастает незначительно.

На основании этих зависимостей элементов баланса от глубины залегания грунтовых вод можно определить критическую глубину залегания грунтовых вод, переход через которую приводит к коренному изменению структуры баланса. В песчаных отложениях она изменяется от 0,5 м в многоводные годы до 1,3 м в маловодные, а в супесчаных отложениях колеблется от 2 до 4 м [14].

На основе балансовых исследований могут быть оценены величины и характер изменения естественных ресурсов грунтовых вод. Максимальных значений (300–400 мм/год, или 9,5–12,7 л/с/км²) они достигают при глубинах залегания уровня грунтовых вод 1,5–2,5 м ниже земной поверхности. В песчаных отложениях минимальные ресурсы (около 200 мм/год, или 6,33 л/с/км²) формируются при глубине залегания уровня до 0,5 м и более 3,5 м, а в супесчаных отложениях (80 мм/год, или 2,5 л/с/км²) при залегании уровня грунтовых вод в интервале глубин 3,5–4,0 м [14].

Балансовыми расчетами [14] установлено, и это является принципиально важным, что поддержание проектной нормы осушения (порядка 0,8 м ниже земной поверхности) и оптимального водно-воздушного режима в корнеобитаемом слое растений невозможно без дополнительной подачи воды на увлажнение из гарантированного источника, находящегося вне мелиоративной системы. В пределах бассейна р. Припять, при условии поддержания уровня воды в среднем на глубине 0,8 м от земной поверхности, в годы с обеспеченностью осадками от 35 до 64 % на дополнительное увлажнение корнеобитаемого слоя требуется 40–60 мм слоя воды (400–600 м³/га). В маловодные годы (при обеспеченности атмосферными осадками от 65 до 80 %) потребность в воде возрастает до 1000 м³/га. В многоводные годы (при обеспеченности осадками от 1 до 34 %) возникает необходимость сброса воды с мелиоративной системы до 300–400 м³/га/год. На мелиоративных системах, построенных на супесчаных отложениях, для поддержания оптимального водно-воздушного режима в корнеобитаемом слое требуется дополнительно прилекать около 500 м³/га воды [14].

Таким образом, состояние подземных вод на мелиорируемых землях оказывает решающее влияние на эффективность работы осушительных систем. В свою очередь, оно в огромной степени зависит как от режима их эксплуатации, так и от климатических факторов (количества осадков, температуры воздуха и др.).

В последние три десятилетия в Беларуси резко сократились объемы нового мелиоративного строительства. В основном ставится задача поддержания в рабочем состоянии действующих осушительных систем. В связи с этим описанное влияние осушительной мелиорации на состояние подземных вод в ближайшие десятилетия будет стабильным и геэкологические риски, обусловленные данным фактором, не будут усиливаться.

Факторы формирования качества подземных вод. Как было показано ранее, Беларусь обладает весьма значительными ресурсами пресных подземных вод, которые многократно превышают ее потребности, причем как в настоящее время, так и на отдаленную перспективу. В связи с этим основные проблемы при использовании их ресурсов напрямую связаны не с количеством, а с *качеством подземных вод*.

Формирование химического состава пресных подземных вод Беларуси происходит в результате сложного процесса взаимодействия разнообразных *природных и антропогенных факторов*. Это климатические (количество атмосферных осадков и их состав, температура воздуха и др.), геологические, гидрогеологические и геоморфологические (состав покровных и водовмещающих отложений, характер динамики подземных вод, заболоченность территории, особенности рельефа земной поверхности), а также большая группа антропогенных (промышленное, коммунально-бытовое, сельскохозяйственное и другие виды загрязнений, осушительная мелиорация и т. д.) факторов [1].

Природные факторы. Геологический разрез покровных отложений на территории Беларуси в целом характеризуется хорошей проницаемостью, что наряду с гумидным климатом региона обуславливает формирование в верхней гидродинамической зоне – зоне активного водообмена – мощной толщи подземных вод с относительно невысокой минерализацией – от 15–100 до 300–400 мг/дм³, редко более. Мощность этой толщи в пределах Беларуси изменяется от 150–250 до 350–450 м и лишь в крайней ее юго-западной части в пределах Брестского артезианского бассейна достигает 1000 м. Минимальные мощности зоны пресных подземных вод (150–200 м) фиксируются в пределах долин рек Березины и Западной Двины [13, 15].

Химический состав пресных подземных вод, которые используются для нужд хозяйственно-питьевого водоснабжения, характеризуется чрезвычайно большим разнообразием геохимических типов и большой изменчивостью во времени. В первую очередь это касается подземных вод первого от поверхности безнапорного водоносного горизонта – *грунтовых вод*. Именно на этом горизонте оборудовано абсолютное большинство источников *нецентрализованного водоснабжения* – шахтных колодцев и неглубоких (до 10–15 м) скважин на частных подворьях. В *естественных условиях*, т. е. на участках, где

отсутствуют источники сельскохозяйственного, коммунально-бытового, промышленного или какого-либо другого вида антропогенного загрязнения, грунтовые воды имеют, как правило, *гидрокарбонатный магниево-кальциевый* состав¹. Основными макрокомпонентами антропогенного загрязнения грунтовых вод являются хлор-ион (Cl^-), нитрат-ион (NO_3^-), сульфат-ион (SO_4^{2-}), натрий-ион (Na^+) и калий-ион (K^+). Поступление их в различных сочетаниях в грунтовые воды на участках антропогенного загрязнения обуславливает формирование широкого спектра геохимических типов грунтовых вод: *хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатных, нитратно-хлоридно-гидрокарбонатных натриево-магниево-кальциевых, кальцево-натриевых* и многих других.

Уровни антропогенного загрязнения грунтовых вод по перечисленным компонентам часто превышают значения предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных для питьевых вод источников нецентрализованного водоснабжения [17]. Наиболее часто такое превышение фиксируется для нитрат-иона (NO_3^-). При уровне ПДК для нитрат-иона, равном 45 мг/дм^3 , в водах колодцев его содержание нередко достигает $100\text{--}200 \text{ мг/дм}^3$, а в отдельных случаях – $300\text{--}500 \text{ мг/дм}^3$ и более [18]. Характер распределения содержания нитрат-ионов в пресных подземных водах в зависимости от глубины показан на рис. 1. Превышение уровней ПДК в водах колодцев нередко наблюдается также по Cl^- ($>350 \text{ мг/дм}^3$), Na^+ ($>200 \text{ мг/дм}^3$) и общей минерализации ($>1000 \text{ мг/дм}^3$). Часто эти воды неблагоприятны и по *микробиологическим показателям*.

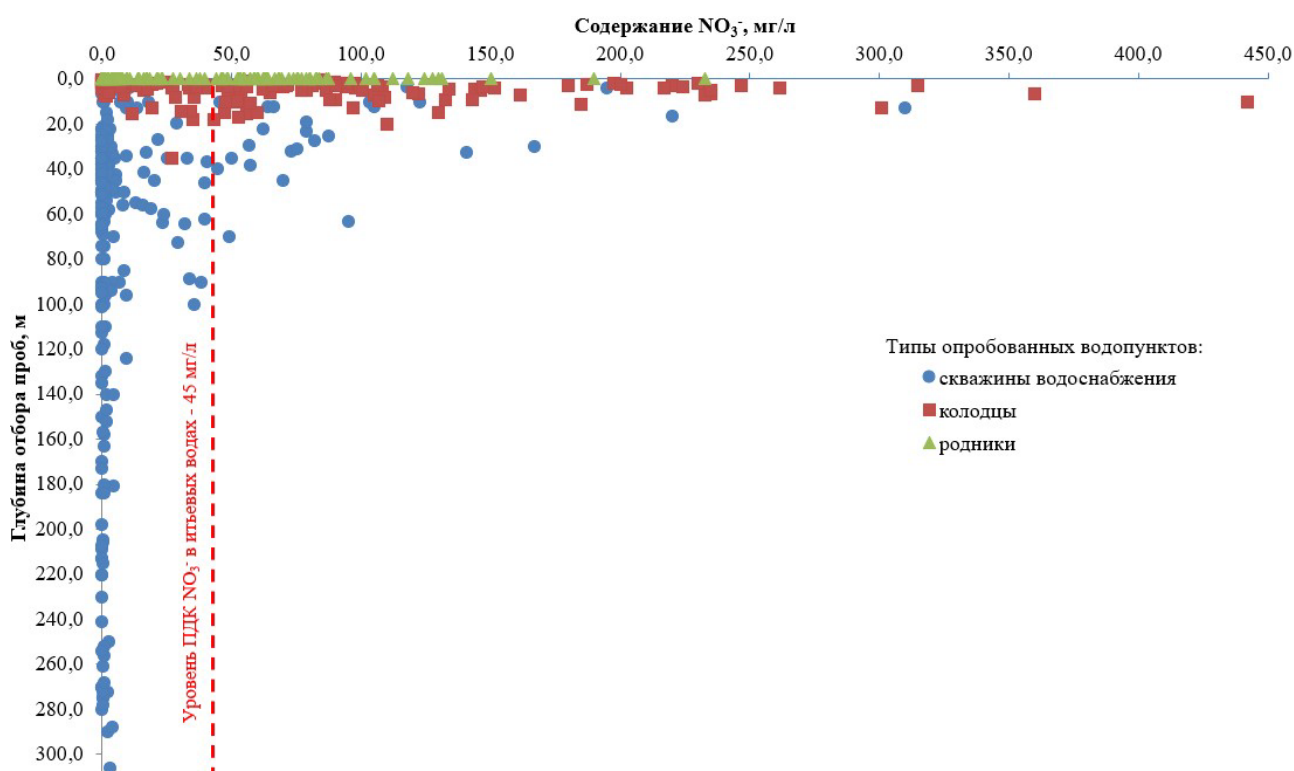


Рис. 1. Распределение содержания нитратов (NO_3^-) в пресных подземных водах на территории Центральной Беларуси в зависимости от глубины

Fig. 1. Distribution of nitrate contamination in fresh groundwater of the Central Belarus depending on the depth

Высокие уровни антропогенного загрязнения являются причиной загрязнения не только колодцев, но и *родников*, поскольку именно грунтовые воды служат основным источником их питания. На тех участках, где в зоне водного (грунтового) питания родников имеются источники сельскохозяйственного или коммунально-бытового загрязнения, содержание нитратов (NO_3^-) в родниковых водах

¹ В соответствии с ОСТ 41-05-263-86 [16] в названиях сложных геохимических типов воды анионы и катионы перечислены в порядке увеличения их концентраций, выраженных в мг-экв/дм³.

может достигать 80–120 мг/дм³. Превышение допустимых уровней по нитратам фиксируется не менее чем в 20 % всех обследованных родников [19]. Это обстоятельство также обуславливает один из значимых *геоэкологических рисков*, так как воды многих родниковых источников население активно использует в питьевых целях.

В отличие от горизонта грунтовых вод, в подземных водах более глубоких напорных водоносных горизонтов следы антропогенного загрязнения наблюдаются значительно реже. Именно на эти горизонты ориентированы все системы *централизованного водоснабжения* и на них оборудованы десятки тысяч водозаборных артезианских скважин групповых и одиночных водозаборов в городах, городских поселках и сельских населенных пунктах.

По химическому составу напорные подземные воды на территории Беларуси являются в основном *гидрокарбонатными магниевое-кальциевыми* с минерализацией от 50–150 до 300–400 мг/дм³ и лишь в нижней части зоны пресных подземных вод на границе с минерализованными они приобретают *гидрокарбонатный натриевый* состав. Их минерализация возрастает при этом до 600–800 мг/дм³.

По химическому составу напорные подземные воды в основном соответствуют требованиям, предъявляемым к водам хозяйственно-питьевого назначения по большинству нормируемых показателей. Исключения составляют часто повышенные содержания в них водорастворенного железа (в форме Fe²⁺ и Fe³⁺). Содержание железа (Fe_{общ}) в водах нередко достигает 1,5–3,0 мг/дм³ и более, что значительно превышает уровень ПДК, установленный для этого компонента – 0,3 мг/дм³. На территории Центральной Беларуси превышение уровней ПДК по железу фиксируется в водах 50–70 % всех артезианских скважин групповых и одиночных водозаборов. Высоким содержаниям железа в подземных водах часто сопутствуют повышенные содержания марганца – до 0,5–0,8 мг/дм³ при уровне ПДК, равном 0,1 мг/дм³. Это обуславливает необходимость строительства на водозаборах подземных вод систем их обезжелезивания и деманганации. В водах относительно глубоких горизонтов (девонском и верхнепротерозойском), имеющих гидрокарбонатный натриевый состав, часто фиксируются повышенные содержания фтора (F⁻) – до 2–4 мг/дм³ при уровне ПДК 1,5 мг/дм³. Характер распределения содержания фтора в пресных подземных водах в зависимости от глубины показан на рис. 2. В этих водах нередко отмечаются также повышенные содержания В и Ва [15].

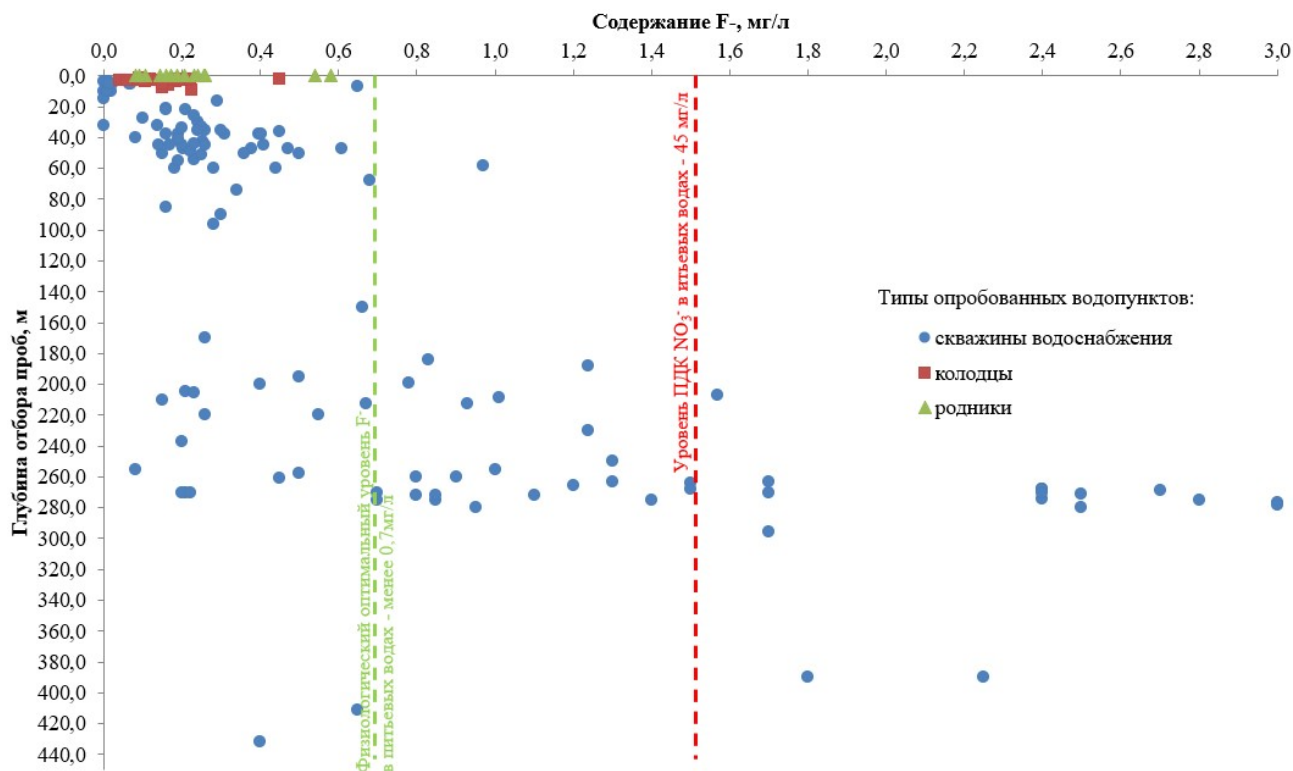


Рис. 2. Распределение содержания фтора (F⁻) в пресных подземных водах на территории Центральной Беларуси в зависимости от глубины

Fig. 2. Distribution of fluoride contamination in fresh groundwater of the Central Belarus depending on the depth

Повышенное содержание в подземных водах указанных компонентов (Fe, Mn, F, B, Ba), обусловлено в основном природными факторами [15]. Так, накоплению железа в грунтовых водах благоприятствует болотная геохимическая среда, характеризующаяся отсутствием кислорода и высоким содержанием водорастворенных органических веществ (гуминовых и фульвокислот). Как следствие, имеет место прямая корреляционная зависимость между степенью заболоченности территории и частотой встречаемости повышенных содержаний железа не только в грунтовых водах, но и в подземных водах более глубоких водоносных горизонтов зоны активного водообмена [20].

На качество подземных вод, используемых для питьевых целей, негативное влияние могут оказывать не только повышенные, но и *чрезмерно низкие содержания* некоторых компонентов. Так, для фтора (F^-) физиологически оптимальное содержание составляет от 0,5 до 1,5 мг/дм³ [17]. Между тем в подавляющем числе скважин и колодцев содержание данного компонента не превышает 0,2–0,3 мг/дм³. Геохимической причиной этого является преобладающий в Беларуси гидрокарбонатный кальциевый состав пресных подземных вод, который препятствует накоплению в них фтора (F^-). Данное обстоятельство также может быть отнесено к числу весьма значимых *геоэкологических рисков* для здоровья населения.

В последние десятилетия на процессы формирования химического состава подземных и, прежде всего, грунтовых вод все большее влияние оказывает *антропогенное загрязнение*. Такие его виды, как *промышленное* и *коммунально-бытовое*, часто приводят к значительной трансформации химического состава *грунтовых вод*, а нередко и более глубоководных *напорных подземных вод*. Однако они проявляются в основном лишь в пределах промышленных площадок предприятий и на селитебных территориях, т. е. на сравнительно небольших площадях. В отличие от них *сельскохозяйственное загрязнение* характеризуется меньшей интенсивностью, но охватывает огромные площади сельскохозяйственных угодий и таким образом, является не локальным, а *региональным*. Очень часто различные виды и площади загрязнений накладываются друг на друга. Так, например, на коммунально-бытовое загрязнение в сельских населенных пунктах повсеместно накладывается сельскохозяйственное, а в городах – промышленное и транспортное.

Сельскохозяйственное загрязнение. Анализ гидрогеохимических материалов по качеству грунтовых вод Беларуси свидетельствует о том, что на площади практически всех сельскохозяйственных земель, где вносятся минеральные или органические удобрения, естественный гидрогеохимический фон грунтовых вод существенно нарушен. В первую очередь это выражается в росте содержания в водах таких компонентов, как NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , и некоторых других. В пределах старопахотных земель, где применение минеральных и органических удобрений имеет длительную историю, в грунтовых водах (выборка из 456 анализов) особенно значительно возрастают концентрации NO_3^- – в среднем от 1,2 до 41,6 мг/дм³, Cl^- – от 5,6 до 43,8, SO_4^{2-} – от 4,9 до 32,3, Na^+ – от 3,6 до 15,7, Ca^{2+} – от 2,8 до 30,0, K^+ – от 1,2 до 7,8 мг/дм³. При этом общая минерализация грунтовых вод возрастает в среднем от 215,7 до 356,7 мг/дм³, однако геохимический тип воды остается по-прежнему в основном гидрокарбонатным кальциевым, но с повышенным содержанием NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} и Na^+ . В отличие от старопахотных земель, несколько иная гидрогеохимическая ситуация складывается в пределах мелиорированных (осушенных) территорий. В целом осушение приводит к весьма значительной перестройке процессов формирования режима, баланса и химического состава грунтовых вод. Процесс собственно осушения (до начала применения удобрений) сопровождается ростом минерализации грунтовых вод, главным образом за счет ионов SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} и реже HCO_3^- . На осушенных землях грунтовые воды в приповерхностной зоне в результате окислительной деструкции торфа часто приобретают сульфатный кальциевый состав, совершенно не характерный для пресных подземных вод Беларуси. На стадии сельскохозяйственного использования осушенных земель дальнейшая глубокая трансформация химического состава грунтовых вод связана с применением удобрений [21].

Участками особенно интенсивного сельскохозяйственного загрязнения грунтовых вод являются животноводческие фермы и поля орошения животноводческими стоками. Загрязнение выражается здесь в росте содержания в воде нитратов (до 80–150 мг/дм³), аммония (до 5–18 мг/дм³), хлоридов (до 100–180 мг/дм³) и других компонентов [15]. На таких участках загрязнение часто не только прослеживается в грунтовых водах, но и проникает в напорный водоносный горизонт, особенно при относительно неглубоком (25–35 м) его залегании и отсутствии в его кровле достаточно мощной толщи водоупорных пород. Такие гидрогеологические условия часто характерны для межморенного днепровско-сожского водоносного горизонта на территории Минского, Борисовского и Молодечненского районов. Как следствие, во многих артезианских скважинах, расположенных на животноводческих фермах, здесь в настоящее время фиксируются высокие уровни нитратного загрязнения (до 80–120 мг/дм³).

Коммунально-бытовое загрязнение. В пределах сельских и городских населенных пунктов химический состав грунтовых, а нередко и напорных подземных вод трансформируется под влиянием

коммунально-бытового загрязнения. Оно формируется за счет утечек из выгребных ям и канализационных систем, поступления в подземные воды загрязненных стоков с полей фильтрации и свалок бытовых отходов. В пределах сельских населенных пунктов этому загрязнению, как правило, сопутствует сельскохозяйственное (приусадебные участки, скотоводческие фермы и др.), а в городах на коммунально-бытовое загрязнение накладывается промышленное. Основными компонентами коммунально-бытового загрязнения являются азотистые соединения (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+), хлориды и сульфаты, синтетические моющие средства и многие другие соединения. Коммунально-бытовые стоки характеризуются исключительно высокими уровнями микробиологического загрязнения.

В выборке из 485 анализов, характеризующих химический состав грунтовых вод в пределах сельских населенных пунктов и малых городов (колодцы и неглубокие скважины), средняя минерализация достигает $698,5 \text{ мг/дм}^3$, т. е. более чем в 3 раза превышает средний естественный геохимический фон грунтовых вод Беларуси, а геохимический облик этих вод трансформируется с *гидрокарбонатного кальциевого* в *гидрокарбонатно-нитратно-хлоридный кальциево-натриевый* с повышенным содержанием K^+ . Воды колодцев нередко имеют неудовлетворительное качество также из-за повышенной минерализации (более 1000 мг/дм^3), общей жесткости (более 10 мг-экв/дм^3) содержания хлоридов (более 350 мг/дм^3). Однако наиболее часто из разряда кондиционных их выводят повышенные содержания *нитратов* (более 45 мг/дм^3). В выборке из 1029 анализов среднее содержание нитратов в водах колодцев составляет $150,9 \text{ мг/дм}^3$ (более 3 ПДК), а максимальное достигает $1000\text{--}2490 \text{ мг/дм}^3$. В целом воды 82 % всех опробованных колодцев содержат нитраты в количествах, превышающих уровни ПДК. Часто эти воды неблагоприятны и по микробиологическим показателям.

Колодцами в Беларуси продолжает пользоваться значительная часть сельского населения и многие жители небольших городов и городских поселков. Неудовлетворительное качество питьевой воды из-за нитратного загрязнения (нитраты относятся к токсикологическим показателям вредности) обуславливает весьма существенные *геоэкологические риски для здоровья населения*, а качество сельского водоснабжения следует считать одной из острейших экологических проблем Беларуси.

К категории коммунально-бытового загрязнения относится также загрязнение подземных вод, формирующееся в пределах свалок (полигонов твердых отходов) и очистных сооружений коммунальных служб. Так, в грунтовых водах зон влияния полигонов твердых бытовых отходов г. Минска содержится обширный комплекс тяжелых металлов 1–3-го классов опасности: бериллий, ванадий, хром (полигон «Северный» – до 1233 мкг/дм^3 при ПДК, равной 500 мкг/дм^3), марганец (полигон «Тростенец» – до 215 мкг/дм^3 при ПДК, равной 100 мкг/дм^3), кобальт, никель (полигон «Тростенец» – до 199 мкг/дм^3 при ПДК, равной 100 мкг/дм^3 , полигон «Северный» – до 576 мкг/дм^3), медь, цинк, мышьяк, селен, молибден, кадмий (полигон «Северный» – до $1,89 \text{ мкг/дм}^3$ при ПДК, равной 1 мкг/дм^3), барий и свинец, источниками которых являются фильтраты свалочного субстрата отходов [15].

Промышленное загрязнение. В отличие от сельскохозяйственного и коммунально-бытового загрязнения, которые охватывают весьма обширные площади (пахотные земли, приусадебные участки, селитебные территории), промышленное загрязнение проявляется в основном на локальных участках, однако по многим компонентам оно своей интенсивностью их превосходит. В целом перечень компонентов промышленного загрязнения исключительно разнообразен и определяется главным образом характером производства и перечнем веществ, применяемых либо образующихся в технологических процессах. На предприятиях машиностроения и металлообработки это нефтепродукты, тяжелые металлы; на предприятиях пищевой промышленности – органические вещества, хлориды и др.

На многих автозаправочных станциях, *промышленных площадках предприятий, в местах хранения нефтепродуктов* вследствие их утечек и аварийных разливов часто фиксируется загрязнение нефтепродуктами не только почвогрунтов, но и грунтовых вод. Такое загрязнение наблюдается почти на 50 % обследованных объектов [4]. В некоторых случаях на участках особенно интенсивных утечек и аварийных разливов на зеркале грунтовых вод формируются линзы утерянных нефтепродуктов, общая масса которых может достигать десятков и сотен тонн. Такие случаи были зафиксированы на Минском тракторном заводе, Борисовском шпалопропиточном заводе, в Брестском локомотивном депо, на Молодечненской нефтебазе и других объектах [15]. Учитывая тот факт, что для нефтепродуктов установлен очень жесткий уровень ПДК в питьевых водах ($0,1 \text{ мг/дм}^3$), даже самое малое их количество, поступившее в горизонт грунтовых вод, создает значительную экологическую угрозу для систем питьевого водоснабжения, ориентированных на подземные воды.

Обширный комплекс высокотоксичных *тяжелых металлов* фиксируется в грунтовых водах на участках размещения полигонов промышленных отходов г. Минска: марганец – до $308\text{--}9416 \text{ мкг/дм}^3$ (МТЗ–МПКО, «Прудиче»), кобальт – до 124 (МТЗ–МПКО), никель – до 1351, цинк – до 2008, кадмий – до 7 мкг/дм^3 при ПДК, равной 1 мкг/дм^3 [15].

В пределах *Осиповичского подземного хранилища газа* (ПХГ) утечки природного газа из пласта-коллектора и поступление его в вышележащие водоносные горизонты обуславливают протекание

в подземных водах ряда специфических геохимических процессов с накоплением в них сероводорода (H_2S) [15]. В некоторых населенных пунктах в зоне влияния Осиповичского ПХГ в водах колодцев и скважин водоснабжения содержание сероводорода достигает $1,2\text{--}3,4\text{ мг/дм}^3$ при уровне ПДК в питьевых водах $0,003\text{ мг/дм}^3$ [17].

На территории Беларуси ярким примером промышленного загрязнения подземных вод является техногенный ореол в районе калийных комбинатов ОАО «Беларуськалий». В *Солигорском горнопромышленном районе* на площади более 100 км^2 сформировалась зона *хлоридно-натриевого засоления подземных вод*, которая охватывает не только горизонт грунтовых вод, но и межморенные водоносные горизонты, неогеновый, палеогеновый и меловой водоносные комплексы. Загрязнение здесь прослеживается до глубины $100\text{--}120\text{ м}$. Наиболее высокие уровни характерны для грунтовых вод. При этом наблюдается их постоянный рост. Так, если в 2007 г. максимальная минерализация грунтовых вод вблизи солеотвалов составляла $113,2\text{ г/дм}^3$, в 2008 г. – $128,5$, в 2010 г. – $173,6$, в 2012 г. – $195,0$, то в 2017 г. она уже достигала $224,0\text{ мг/дм}^3$. Загрязнение подземных вод явилось причиной выхода из строя ряда ведомственных скважин водоснабжения ОАО «Беларуськалий». Хлоридно-натриевое загрязнение (часто выше уровней ПДК) наблюдается также во многих колодцах сельских населенных пунктов на территории Солигорского горнопромышленного района. В связи с активным строительством новых калийных рудников (Нежинский, Петриковский ГОК) и расширением площадей, занимаемых объектами хвостового хозяйства (солеотвалы и шламохранилища) масштабы загрязнения пресных подземных вод и обусловленные этим геоэкологические риски будут здесь неизбежно возрастать.

Антропогенное загрязнение (сельскохозяйственное, коммунально-бытовое, промышленное и другие его виды) с наибольшей интенсивностью проявляется в горизонте грунтовых вод. Однако на некоторых участках оно захватывает и более глубокие горизонты напорных подземных вод, на которых оборудованы водозаборные скважины групповых и одиночных водозаборов. Как отмечалось ранее, в пределах групповых водозаборов формируются значительные по размерам депрессионные воронки. Их гидродинамической особенностью являются активные нисходящие перетоки из горизонта грунтовых вод в более глубокие горизонты, которые эксплуатируются на данных водозаборах. В таких условиях оказывается возможным особенно быстрое поступление загрязнения из грунтовых вод в напорные водоносные горизонты. В последние десятилетия такое загрязнение все чаще фиксируется на водозаборах г. Минска (водозаборы «Новинки», «Зеленовка»), Борисова («Лядище»), г. Жодино («Восточный»), г. Гродно («Гожка»), г. Новополоцка («Окунево»), г. Новогрудка («Валовка») и других городов, а также во многих ведомственных одиночных водозаборных скважинах промышленных предприятий. Наиболее часто такое загрязнение проявляется в виде повышенных содержаний в воде нитратов – до $60\text{--}120\text{ мг/дм}^3$ при уровне ПДК 45 мг/дм^3 . Вследствие высоких уровней нитратного загрязнения некоторые скважины групповых водозаборов («Новинки» в г. Минске) и одиночных водозаборов в ряде сельских населенных пунктов в Борисовском, Слуцком, Молодечненском и других районах выводятся из эксплуатации. Помимо нитратов, в водах артезианских скважин, испытывающих антропогенное загрязнение, часто фиксируется высокая общая жесткость – до $9,0\text{--}11,0\text{ мг-экв/дм}^3$ (при допустимом уровне $7,0\text{ мг-экв/дм}^3$), повышенные содержания аммония (NH_4^+) – до $4,0\text{--}10\text{ мг/дм}^3$ (ПДК – $2,6\text{ мг/дм}^3$), а также тяжелых металлов (Cr, As, Pb и др.). Высокое аммонийное (NH_4^+) загрязнение подземных вод наблюдалось на водозаборах в г. Жодино («Восточный»), г. Барановичи («Волохва» и «Щара-1»), г. Гродно («Пышки») и г. Новополоцке («Окунево»). Особенно высокий уровень такого загрязнения имел место на водозаборе «Северный» г. Орши. Здесь в начале 1990-х годов содержание аммония (NH_4^+) в водах эксплуатируемого водоносного горизонта в некоторых скважинах достигало 52 мг/дм^3 при ПДК $2,6\text{ мг/дм}^3$. По этой причине данный водозабор был ликвидирован, а эксплуатационные запасы подземных вод по нему были исключены из Государственного водного кадастра. Это стало первым в Беларуси случаем ликвидации крупного городского водозабора по причине сформировавшегося на нем высокого антропогенного загрязнения подземных вод.

Потенциально опасным источником загрязнения подземных вод являются *радиоактивные выбросы от аварии на Чернобыльской атомной электростанции*. Площадь сформировавшегося в результате этой аварии поверхностного загрязнения (свыше 1 Ки/км^2 по ^{137}Cs) в пределах Беларуси составляет около 47 тыс. км^2 . Однако покровные отложения и почвы в целом обеспечивают достаточно высокую защищенность подземных вод от проникновения радиоактивных веществ с поверхности. Наблюдаемые в настоящее время уровни загрязнения грунтовых вод по ^{137}Cs относительно невелики (до $0,2\text{--}1,0\text{ Бк/дм}^3$ при ПДК, равной 10 Бк/дм^3), хотя и превышают доаварийные уровни. ^{90}Sr -активность грунтовых вод достигает $0,5\text{--}1,7\text{ Бк/дм}^3$ при ПДК, равной $0,37\text{ Бк/дм}^3$ [15]. Загрязнение грунтовых вод радиостронцием до уровней, превышающих допустимый, зафиксировано лишь в ближней 30-километровой зоне Чернобыльской атомной электростанции. В более глубоких напорных водоносных горизонтах, эксплуатируемых водозаборными скважинами, следов опасного радиоактивного загрязнения не наблюдается [15].

Заключение. Пресные подземные воды, приуроченные к зоне активного водообмена, являются важнейшим компонентом геологической среды Беларуси, ценным и широко используемым полезным ископаемым. В стране практически все хозяйственно-питьевое водоснабжение базируется на использовании подземных вод, что ставит в ряд первоочередных задач гидрогеологии на современном этапе комплексное изучение природных и антропогенных факторов формирования их ресурсов и качества.

К наиболее значимым природным факторам формирования ресурсов подземных вод в Беларуси относятся геолого-геоморфологические, климатические и гидрогеологические условия. В совокупности они определяют величину естественных возобновляемых ресурсов пресных подземных вод на территории страны на уровне 15,9 км³/год (43,56 млн м³/сут), прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод, оцениваемых в 18,1 км³/год (49,6 млн м³/сут), а также балансовых эксплуатационных запасов пресных подземных вод в количестве 6,88 млн м³/сут. Общий водоотбор в настоящее время достигает 2,4–2,5 млн м³/сут. Приведенные данные свидетельствуют о высокой обеспеченности Беларуси ресурсами пресных подземных вод, как на текущий период, так и на отдаленную перспективу.

К числу важнейших антропогенных факторов, влияющих на формирование ресурсов пресных подземных вод, относятся водоотбор подземных вод на групповых и одиночных водозаборах и проведение осушительных мелиораций. В настоящее время в Беларуси эксплуатируется более 30 000 водозаборных скважин. В местах сосредоточенного водоотбора (прежде всего, это групповые водозаборы в городах) формируются крупные депрессионные воронки, охватывающие не только эксплуатационный, но и все горизонты, залегающие выше, вплоть до грунтовых вод. Крупные депрессионные воронки имеют диаметр до 70 км, в их пределах понижение уровня подземных вод достигает 40–60 м. Воздействие осушительной мелиорации проявляется в существенной перестройке процессов формирования режима и баланса подземных вод на мелиорированных землях, что с учетом технического несовершенства дренажных систем часто не позволяет обеспечить поддержание оптимальных уровней грунтовых вод и влажности почв.

Группу природных факторов, определяющих формирование химического состава пресных подземных вод Беларуси, составляют климатические (количество атмосферных осадков и их состав, температура воздуха и др.), геологические, гидрогеологические и геоморфологические (состав покровных и водовмещающих отложений, характер динамики подземных вод, заболоченность территории, особенности рельефа земной поверхности). Под их влиянием обеспечивается формирование мощной (в среднем 250–350 м) толщи подземных вод с относительно невысокой минерализацией – от 15–100 до 300–400 мг/дм³.

Под влиянием большой группы антропогенных факторов (промышленное, коммунально-бытовое, сельскохозяйственное, транспортное, радиационное загрязнение, осушительная мелиорация и др.) происходит существенная трансформация качественного состава грунтовых вод, а нередко и более глубокозалегающих напорных подземных вод. В подземных водах формируются повышенные и иногда аномально высокие содержания NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, K⁺, Na⁺, тяжелых металлов, нефтепродуктов и других веществ, представляющие риск для здоровья населения.

Список использованных источников

1. Пашкевич, В. И. Гидрогеологические факторы, определяющие комфортность среды обитания человека на территории Центральной Беларуси / В. И. Пашкевич, Е. А. Кухарик, А. М. Кухарик // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 131–137. – DOI: 10.47612/2079-3928-2025-1-131-137.
2. Пашкевич, В. Гидроминеральные ресурсы / В. Пашкевич, О. Васнева // Наука и инновации. – 2025. – № 3 (264). – С. 11–15.
3. Полезные ископаемые Беларуси: к 75-летию БелНИГРИ / П. З. Хомич, С. П. Гудак, А. М. Синичка (отв. ред.) [и др.]. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2002. – 528 с.
4. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2016 год) / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, М-во здравоохранения Респ. Беларусь, РУП «ЦНИИКИВР». – Минск, 2017. – 172 с.
5. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2000 год) / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, Гос. комитет по гидрометеорологии, М-во здравоохранения Респ. Беларусь. – Минск, 2001. – 113 с.
6. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2007 год) / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, М-во здравоохранения Респ. Беларусь, РУП «ЦНИИКИВР». – Минск, 2008. – 92 с.
7. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / И. К. Гавич, В. С. Ковалевский, Л. С. Язвин [и др.] ; отв. ред. И. С. Зекцер. – Новосибирск : Наука, 1983. – 242 с.

8. Козлов, М. Ф. Гидрогеология Припятского Полесья : в 2 т. / М. Ф. Козлов ; под ред. Г. В. Богомолова. – Минск : Наука и техника, 1977. – Т. II. – 272 с.
9. Козлов, М. Ф. Количественная оценка питания грунтовых вод в северной части Припятского Полесья / М. Ф. Козлов, Я. М. Шилинская. – Минск : Наука и техника, 1972. – 96 с.
10. Гидрогеологическая экспертиза широкомасштабных осушительных мелиораций Белорусского Полесья / А. В. Кудельский, А. М. Гречко, Т. Д. Кривецкая, В. И. Пашкевич ; под ред. А. А. Хомича. – Минск : Навука і тэхніка, 1993. – 111 с.
11. Гидрогеология / В. М. Шестаков, И. Ф. Фиделли, И. С. Зекцер [и др.] ; под ред. В. М. Шестакова, М. С. Орлова. – М. : МГУ, 1984. – 315 с.
12. Жогло, В. Г. Система численных геофильтрационных моделей верхнего этажа гидролитосферы юго-востока Республики Беларусь / В. Г. Жогло ; под ред. В. И. Пашкевича. – Минск : Ин-т геол. наук НАН Беларуси, 2001. – 177 с.
13. Кудельский, А. В. Подземные воды Беларуси / А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич, М. Г. Ясовеев ; под ред. В. С. Усенко. – Минск : Ин-т геол. наук НАН Беларуси, 1998. – 260 с.
14. Гречко, А. М. Закономерности режима подземных вод юго-восточной части Белорусского Полесья в условиях осушительной мелиорации : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 04.00.06 / Гречко Анатолий Михайлович ; Ин-т геохимии и геофиз. АН БССР. – Минск, 1987. – 20 с.
15. Кудельский, А. В. Региональная гидрогеология и геохимия подземных вод Беларуси / А. В. Кудельский, В. И. Пашкевич. – Минск : Бел. навука, 2014. – 271 с.
16. Воды подземные, классификация по химическому составу и температуре. Отраслевой стандарт. Издание официальное : ОСТ 41-05-263-86. – Введ. 12.05.86. – М. : ВСЕГИНГЕО, 1986. – 12 с.
17. Об утверждении гигиенических нормативов («Показатели безопасности питьевой воды», с. 187–225) : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 25 янв. 2021 г. № 37 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система. – URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=c22100037> (дата обращения: 29.10.2025).
18. Пашкевич, В. И. Условия формирования нитратного загрязнения грунтовых вод Беларуси / В. И. Пашкевич // Природопользование и охрана окружающей среды – 2000 : сб. ст. / редкол.: И. И. Лиштван (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ИПИПРЭ НАН Беларуси, 2000. – С. 30–31.
19. Пашкевич, В. И. Гидрогеохимическое разнообразие родниковых источников на территории Беларуси / В. И. Пашкевич // Актуальные вопросы эффективного и комплексного использования водных ресурсов : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., приуроч. ко Всемирному дню водных ресурсов, Минск, 22–24 марта 2023 г. / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, РУП «ЦНИИКИВР» ; отв. ред. О. В. Ковзунова. – Минск : Нац. б-ка Беларуси, 2023. – С. 62–64.
20. Пашкевич, В. И. Геохимия подземных вод зоны активного водообмена восточной части Белорусского Полесья в связи с мелиорацией : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 04.00.06 / Пашкевич Василий Иванович ; ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии. – М., 1986. – 22 с.
21. Пашкевич, В. И. Влияние осушительных мелиораций на формирование химического состава грунтовых вод / В. И. Пашкевич // Формирование подземных вод под влиянием антропогенных факторов : сб. науч. ст. / под ред. А. В. Кудельского. – Минск : Наука и техника, 1990. – С. 73–86.

References

1. Pashkevich V. I., Kukharik E. A., Kukharik A. M. *Gidrogeologicheskie faktory, opredelyayushchie komfortnost' srede obitaniya cheloveka na territorii Tsentral'noi Belarusi* [Hydrogeological factors determining the comfort of the human habitat in the territory of Central Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 131–137. DOI: 10.47612/2079-3928-2025-1-131-137. (in Russian)
2. Pashkevich V., Vasneva O. *Gidromineral'nye resursy* [Hydromineral resources]. *Nauka i innovatsii = Science and Innovations*, 2025, no. 3 (264), pp. 11–15. (in Russian)
3. Khomich P. Z., Gudak S. P., Sinichka A. M. (eds.) [et al.] *Poleznye iskopaemye Belarusi: k 75-letiyu BelNIGRI* [Minerals of Belarus: to the 75th anniversary of BelNIGRI]. Minsk, Adukatsyya i vykhavanne Publ., 2002. 528 p. (in Russian)
4. *Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Vodnye resursy, ikh ispol'zovanie i kachestvo vod (za 2016 god)* [State Water Cadastre. Water Resources, Their Use and Water Quality (for 2016)]. – Minsk, 2017. – 172 p. (in Russian)
5. *Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Vodnye resursy, ikh ispol'zovanie i kachestvo vod (za 2000 god)* [State Water Cadastre. Water Resources, Their Use and Water Quality (for 2000)]. – Minsk, 2001. – 113 p. (in Russian)
6. *Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Vodnye resursy, ikh ispol'zovanie i kachestvo vod (za 2007 god)* [State Water Cadastre. Water Resources, Their Use and Water Quality (for 2007)]. – Minsk, 2008. – 92 p. (in Russian)
7. Gavich I. K., Kovalevskii V. S., Yazvin L. S. [et al.] *Osnovy gidrogeologii. Gidroeodinamika* [Fundamentals of Hydrogeology. Hydrogeodynamics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 242 p. (in Russian)
8. Kozlov M. F. *Gidrogeologiya Pripyatskogo Poles'ya: v 2 t.* [Hydrogeology of the Pripyat Polesie: in 2 vol.]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1977, vol. II, 272 p. (in Russian)
9. Kozlov M. F., Shilinskaya Ya. M. *Kolichestvennaya otsenka pitaniya gruntovykh vod v severnoi chasti Pripyatskogo Poles'ya* [Quantitative assessment of groundwater recharge in the northern part of the Pripyat Polesie]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1972, 96 p. (in Russian)
10. Kudelsky A. V., Grechko A. M., Krivetskaya T. D., Pashkevich V. I. *Gidrogeologicheskaya ekspertiza shirokomasshtabnykh osushitel'nykh melioratsii Belorusskogo Poles'ya* [Hydrogeological examination of large-scale drainage melioration of the Belarusian Polesie]. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ., 1993, 111 p. (in Russian)

11. Shestakov V. M., Fidelli I. F., Zektser I. S. [et al.] *Gidrogeologiya* [Hydrogeology]. Moscow, MGU Publ., 1984, 315 p. (in Russian)
12. Zhoglo V. G. *Sistema chislennykh geofil'tratsionnykh modelei verkhnego etazha gidrolitosfery yugo-vostoka Respubliki Belarus'* [System of numerical geofiltration models of the upper level of the hydrolithosphere of the south-east part of the Republic of Belarus]. Minsk, In-t geol. nauk NAN Belarusi Publ., 2001, 177 p. (in Russian)
13. Kudelsky A. V., Pashkevich V. I., Yasoveev M. G. *Podzemnye vody Belarusi* [Groundwater of Belarus]. Minsk, In-t geol. nauk NAN Belarusi, 1998, 260 p. (in Russian)
14. Grechko A. M. *Zakonomernosti rezhima podzemnykh vod yugo-vostochnoi chasti Belorusskogo Poles'ya v usloviyakh osushitel'noi melioratsii. Avtoref. dis. kand. geol.-mineral. nauk* [Regularities of the groundwater regime in the south-eastern part of the Belarusian Polesie under drainage melioration conditions. Abstract Ph.D geol.-mineral. sci.]. Minsk, 1987, 20 p. (in Russian)
15. 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)
16. *Vody podzemnye, klassifikatsiya po khimicheskomu sostavu i temperature. Otrasevoi standart. Izdanie ofitsial'noe (OST 41-05-263-86, vved. 12.05.1986)* [Groundwater, classification by chemical composition and temperature. Industry standard. Official publication (OST 41-05-263-86, introduced 12.05.1986)]. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1986, 12 p. (in Russian)
17. On approval of hygiene standards ("Drinking Water Safety Indicators", pp. 187–225) [Electronic resource]. – URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=c22100037> (date of access: 29.10.2025).
18. Pashkevich V. I. *Usloviya formirovaniya nitratnogo zagryazneniya gruntovykh vod Belarusi* [Conditions of formation of groundwater nitrate pollution in Belarus]. *Prirodopol'zovanie i okhrana okruzhayushchei sredy – 2000. Sbornik statei* [Nature management and environmental protection – 2000. Collection of articles]. Minsk, IIPRE NAN Belarusi Publ., 2000, pp. 30–31. (in Russian)
19. Pashkevich V. I. *Gidrogeokhimicheskoe raznoobrazie rodnikovyykh istochnikov na territorii Belarusi* [Hydrogeochemical diversity of spring sources on the territory of Belarus]. *Aktual'nye voprosy effektivnogo i kompleksnogo ispol'zovaniya vodnykh resursov: sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, priurochennoi ko Vsemirnomu dnyu vodnykh resursov* [Topical issues of efficient and integrated use of water resources: collection of materials of the international scientific and practical conference, dedicated to the World Water Day]. Minsk, 2023, pp. 62–64. (in Russian)
20. Pashkevich V. I. *Geokhimiya podzemnykh vod zony aktivnogo vodoobmena vostochnoi chasti Belorusskogo Poles'ya v svyazi s melioratsiei. Avtoref. dis. kand. geol.-mineral. nauk* [Geochemistry of groundwater in the active water exchange zone of the eastern part of the Belarusian Polesie due to the land reclamation. Abstract Ph.D geol.-mineral. sci.]. Moscow, 1986, 22 p. (in Russian)
21. Pashkevich V. I. *Vliyanie osushitel'nykh melioratsii na formirovanie khimicheskogo sostava gruntovykh vod* [The influence of drainage melioration on the formation of the groundwater chemical composition]. *Formirovanie podzemnykh vod pod vliyaniem antropogennykh faktorov. Sbornik nauchnykh statei* [Formation of groundwater under the influence of anthropogenic factors. Collection of articles]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1990, pp. 73–86. (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 – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: anyahomich@mail.ru

Балашов Константин Юрьевич – старший научный сотрудник, проектное унитарное предприятие «Калийпроект» ул. Коржа, 5, 223710, г. Солигорск, Беларусь). E-mail: balashovkj@gmail.com

Information about the authors

Vasily 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 Laboratory 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 – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: anyahomich@mail.ru

Konstantin Yu. Balashov – Senior Researcher, Design Unitary Enterprise "Kaliproekt" (5, Korzha Str., 223710, Soligorsk, Belarus). E-mail: balashovkj@gmail.com

УДК 550.8.028

*Поступила в редакцию 31.10.2025
Received 31.10.2025*

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ ПРИМЕНЯЕМЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕДР ЗЕМЛИ ЭНДЕРБИ В РАЙОНЕ БЕЛОРУССКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Я. Г. Грибик, П. В. Шаблыко, Н. В. Козловский, М. А. Шеметило*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

Аннотация. Представлены анализ и результаты геолого-геофизических исследований Земли Эндерби на Вечернегорской площади в районе белорусской антарктической станции. Кратко охарактеризованы методика и средства, применяемые при геологических исследованиях.

Построены карты распределения геомагнитных полей на обнаженных участках, обусловленные тектоно-физическими особенностями, геомагнитным мониторингом за суточными вариациями, а также исследования стабильной площадки под проектирование немагнитного павильона. Установлены аномалии на карте активного гамма-поля и по пяти радионуклидам, очевидно, связанные с вещественным составом коренных пород, которые подтверждаются гамма-спектрометрической съемкой. По гравитационным исследованиям установлены изменения силы тяжести с корректировкой на высоту и промежуточный слой другой плотности пород, осложняющий полевые гравиметрические исследования.

По карте остаточной намагниченности, построенной по каппаметрической съемке, установлена приуроченность параметра намагниченности к вещественному составу горных пород. Применение шлиховой съемки на участках сноса обломочного материала усложняется ледниковыми образованиями.

Минеральный состав горных пород по данным шлихового опробования, анализа шлифов и лабораторных анализов свидетельствует о значительной перспективной минеральной составляющей горных пород. По апробируемым методам получены результативные данные, позволяющие использовать их для последующего изучения недр. Продолжение работ планируется в следующем комплексе: геомагнитная съемка, регистрация вариаций геомагнитных полей, съемки на беспилотных летательных аппаратах, радиометрическая и гамма-спектрометрическая съемка, лабораторные исследования горных пород.

Ключевые слова: восточная Антарктида; геофизика; магниторазведка; гравиторазведка; радиометрия; каппаметрия; шлиховая съемка; беспилотные летательные аппараты.

Для цитирования: Грибик Я. Г., Шаблыко П. В., Козловский Н. В., Шеметило М. А. Анализ и результативность применяемых геолого-геофизических методов исследования недр Земли Эндерби в районе белорусской антарктической станции // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 114–130.

ANALYSIS AND EFFECTIVENESS OF APPLIED GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL METHODS FOR SUBSOIL INVESTIGATIONS OF THE ENDERBY LAND IN THE AREA OF THE BELARUSIAN ANTARCTIC STATION

Ya. G. Gribik, P. V. Shablyko, N. V. Kozlovsky, M. A. Shemetilo*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

Abstract. Analysis and results of geological and geophysical studies in the Enderby Land, Vechnegorskaya area of Belorussian Antarctic station, are presented. Methodology and means are described briefly, used in geological research.

The maps of the distribution of geomagnetic fields of exposed areas based on tectonophysical characteristics, geomagnetic monitoring of daily variations and research of a stable site for the projecting of a non-magnetic pavilion were built. The anomalies of active gamma field and of five radionuclides, which are connected to composition of bedrocks that is proven by spectrometric survey, were determined. The gravity studies established changes in gravity field with correction to altitude and to an intermediate layer of other rock density, which makes it harder to gravity researches by foot.

According to the map of residual magnetism, which is constructed on kappametric survey, the confinement of magnetization with the mineral composition of the rocks was established. Realization of schlich sampling is complicated due to glacial formations.

Mineral composition of rocks, according to the results of schlich sampling, analysis of thin section and laboratory analysis, demonstrates significant prospective mineral element of rocks. Data obtained by tested methods that can be used for further subsoil exploration. The continuation of works is planned like this: geomagnetic survey, recording of variations of geomagnetic fields, unmanned aerial vehicles survey, radiometric and gamma spectrometric survey and laboratory researches of rocks.

Keywords: East Antarctica; geophysics; magnetic survey; gravity survey; radiometry; kappametry; heavy mineral survey; unmanned aerial vehicles.

For citation. Gribik Ya. G., Shablyko P. V., Kozlovsky N. V., Shemetilo M. A. Analysis and effectiveness of applied geological and geophysical methods for subsoil investigations of the Enderby Land in the area of the Belarusian Antarctic station. *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 114–130.

Введение. Геологические и геофизические работы в Восточной Антарктиде (Земля Эндерби) на Вечернегорской площади систематически проводятся Центром полярных исследований Национальной академии наук Беларуси и представляют собой важнейшую часть комплекса научных исследований. С 2009 г. белорусскими исследователями был произведен ряд геолого-геофизических работ с целью уточнения геологического и тектонического строения, а также изучения морфологии геофизических полей. В данной статье кратко рассматриваются анализ и результаты выполнения полевых геолого-геофизических исследований в районе расположения белорусской антарктической станции (БАС) в летние антарктические сезоны.

Одним из наиболее эффективных методов изучения геологического строения региона является анализ геологической природы геофизических полей, прежде всего магнитного. Так, например, аномальное магнитное поле в открытых областях, каковой является прибрежная часть Вечернегорской площади, обусловлено глубинными магнитными неоднородностями горных пород в районе разломно-интрузивной тектоники: над различными геологическими телами магнитные аномалии фиксируются различной интенсивности и формы.

В рамках изучения временных вариаций геофизических полей в пределах Вечернегорской структуры был выделен участок, пригодный для сооружения немагнитного павильона (немагнитная тумба – как временное решение), предназначенного для проведения стационарных сезонных и в перспективе круглогодичных геомагнитных наблюдений. Данные, а именно значение модуля T , полученные за период сезонных наблюдений 2021–2025 гг., позволяют выяснить геофизическую и геологическую природу короткопериодных вариаций геомагнитного поля с учетом международных стандартов и требований, предъявляемых к подобным объектам.

Основным поисковым и разведочным методом радиометрических и спектрометрических исследований является пешеходная съемка. Ее выполняют с помощью полевых радиометров и спектрометров (СРП-68, СП-88, МКС-АТ6101ДР). Актуальность данному методу придают относительно невысокие временные и материальные затраты при хорошей геологической информативности метода работ. Данные радиометрических и спектрометрических исследований позволяют уточнить геологическое строение территории и более четко определить границы тектонических структур.

Описаны также такие виды работ, как опытное шлиховое опробование и капаметрическая съемка.

В ходе работ в антарктических условиях отрабатывались методы и способы выполнения геолого-геофизических исследований в районах, в пределах которых выход древних коренных пород перекрыт молодыми образованиями или снежно-ледовым покровом. В таких условиях первоочередную роль играют геофизические методы с регистрацией соответствующего геофизического поля.

Связующим элементом для интерпретации геофизических данных с учетом геологических данных являются лабораторные исследования горных пород, выполненные в анализируемый период.

Основная цель работы – провести комплексное изучение особенностей геологического строения недр Земли Эндерби в районе расположения БАС.

Для решения данной задачи применяется комплекс геолого-геофизических методов, обеспечивающий определение структурно-вещественных характеристик и минерогенических особенностей горных пород на основе геофизических, геохимических и петрофизических параметров.

Краткая характеристика объекта исследования. Восточная Антарктида и территория Земли Эндерби представляют собой древнюю докембрийскую платформу, сложенную в основном метаморфическими породами гранулитовой фации архейского эндербит-чарнокитового комплекса с ярко выраженным блоковым строением.

Выход коренных пород прослеживается в узкой прибрежной зоне шириной от 1 до 5 км, перекрываемых вверх снежно-ледниковым массивом.

Средства и методы исследований. Основу исследования составляют результаты комплекса геолого-геофизических методов недр земли Эндерби в районе БАС. Применяемая методика включает стационарные, маршрутные и площадные измерения различных геофизических полей, структурные замеры различных выходов горных пород, указывающие на тектонические деформации, шлиховую съемку с анализом минералогической составляющей, а также съемку с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с дальнейшей дешифровкой и анализом с позиции современных тектонических процессов.

В ходе последних белорусских антарктических экспедиций (БАЭ) для работы было использованы следующее оборудование:

1) пешеходный оверхаузерный магнитометр MMPOS-1. Предназначен для измерения модуля геомагнитного поля и может использоваться как для проведения пешеходных съемок, так и в качестве стационарной вариационной станции. Диапазон измерения магнитного поля: 20 000–100 000 нТл. Среднеквадратичная погрешность измерения: <0,01 нТл;

2) прибор сцинтилляционный геологоразведочный СРП-68-01. Предназначен для измерения гамма-излучения на поверхности пород и в горных выработках. Измерения гамма-излучения производятся в мкР/ч;

3) мобильный гамма-спектрометр МКС-АТ6101ДР. Предназначен для измерения общей мощности дозы гамма-излучения, а также идентификации по основным изотопам (радионуклидам), таким как радий (Ra-226), торий (Th-232), цезий (Cs-137, Cs-134) и калий (K-40). Измерения производятся в мк³в/ч;

4) GPS-навигатор GARMIN GPSmap78;

5) гравиметр ГНУ-КС № 405. Использовался с целью получения информации об общей картине гравитационного поля, проведены измерения приращения силы тяжести;

6) гексокоптер A20-X – БПЛА. Позволил выполнить фотовидеофиксацию территории с воздуха, построить 3D модели и ортофотоплан местности и инфраструктуры для решения ряда научно-практических задач, в том числе для уточнения данных площадной геологической, спектрометрической и геомагнитной съемок.

Результаты и их обсуждение. Проведение геомагнитометрических исследований. В период полевых сезонов БАЭ был проведен ряд геофизических и геологических работ на территории участка горы Вечерняя, расположенного в Восточной Антарктиде – Земля Эндерби с координатами 67°38'7"–67°41'0"S и 46°02'7"–46°14'0"E. Первые работы по изучению геологического строения и геофизических полей были выполнены в полевой сезон 2008–2009 гг. научным сотрудником Института природопользования НАН Беларуси О. В. Мясниковым. В ходе экспедиции были отобраны образцы горных пород по серии маршрутов. Данные образцы были проанализированы в лабораториях РУП «Белгеология» с петрографических, петрохимических и петрофизических позиций. Этим же исследователем были выполнены первоначальные работы по измерению магнитного и гравитационного полей [1].

Для уточнения характеристик геофизических полей, а также с целью детализации вещественного состава горных пород, слагающих территорию, в последующие годы были проведены дополнительные геолого-геофизические исследования.

В 2014–2015 и 2017–2018 гг. младший научный сотрудник П. В. Шаблыко выполнил маршрутную и площадную магнитную съемку территории с помощью магнитометров Lemi-018, результатом которых стало построение первой карты аномального магнитного поля [2].

В ходе последующих экспедиций был использован магнитометр MMPOS-1, представляющий собой высокоточный прибор, основанный на эффекте Оверхаузера. Магнитометр предназначен для измерения модуля геомагнитного поля и может использоваться как для проведения детальных магнитных пешеходных съемок, так и в качестве стационарной вариационной станции. Блок управления магнитометром позволяет подключать GPS-приемник для осуществления координатной привязки измерений на местности. Маршрутные наблюдения проводились с шагом 10–25 м, учитывая сложности рельефа.

Исследования геомагнитных вариаций. Для исключения суточных вариаций во время проведения маршрутных исследований всегда синхронно устанавливали стационарный пункт наблюдения, который располагали на предполагаемом участке заложения немагнитного павильона вблизи станции «Гора Вечерняя».

В общей сложности наблюдения на Вечернегорской площади были проведены более чем на 7700 пунктах измерений.

После обработки данных был построен ряд карт наблюденного геомагнитного поля T , включая общую обзорную карту и карты детализации на отдельных участках (рис. 1). По результатам геомагнитных исследований Вечернегорской площади установлено, что наибольшее значение поля T приурочено к выходу архейских пород, представленных биотит-роговообманково-двупироксеновыми плагиогнейсами по диоритовой породе, мелко и среднезернистыми, приуроченными к береговым участкам [3].

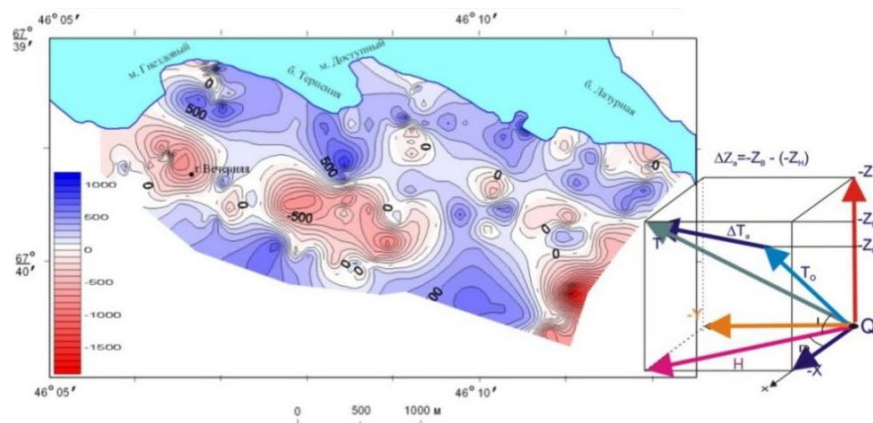


Рис .1. Карта аномального магнитного поля Вечнегорской площади, выполненная с помощью магнитометра ММПОС-1

Fig. 1. Map of the anomalous magnetic field of the Vechnegorskaya area acquired using the MMPOS-1 magnetometer

Результативным является использование геомагнитных исследований и в других геологических регионах, в частности, при изучении участка в районе базирования болгарской антарктической станции «Св. Климент Охридский», расположенной на острове Ливингстон (оператор – научный сотрудник П. В. Шаблыко, 2020 г.). Наблюдаемое геомагнитное поле характеризуется изменчивыми условиями по простиранию и амплитуде. К повышенным значениям магнитного поля приурочены интрузивные тела (дайки). Тектонические разломы характеризуются невысокими значениями геомагнитного поля [4] (рис. 2).

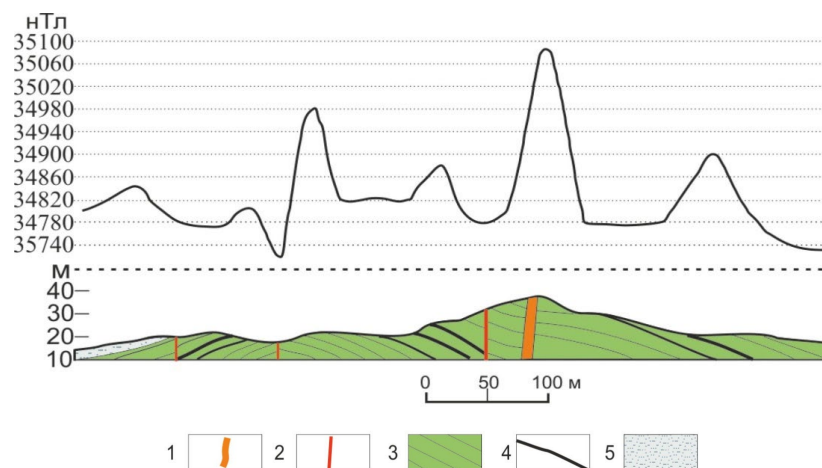


Рис. 2. Геолого-геофизический разрез на острове Ливингстон с графиком магнитных аномалий по профилю запад – восток:

- 1 – дайки, установленные по геологическим данным; 2 – разломы, установленные по геологическим данным; 3 – песчаники; 4 – черные аргиллиты, 5 – отложения морских террас. 2020 г.

Fig. 2. Geological-geophysical section of Livingston Island with a west – east profile of magnetic anomalies:

- 1 – dikes identified from geological data; 2 – faults identified from geological data; 3 – sandstones; 4 – black argillites; 5 – marine terrace deposits. 2020

Геомагнитные исследования также возможны при изучении шельфовых участков моря. С помощью пешеходного магнитометра ММПОС-1 была выполнена пробная геомагнитная съемка на морском льду в бухте Лазурная (залив Алашеева, море Космонавтов). Наблюдаемое магнитное поле на этом участке варьируется от 44 000 нТл со стороны берега и значительно возрастает с увеличением глубины до 44 460 нТл (рис. 3). Исследование проводили на небольшом участке, порядка 50 м, в прибрежной зоне с максимальной глубиной до 100 м; толщина льда составляла порядка 1,5–2,0 м.

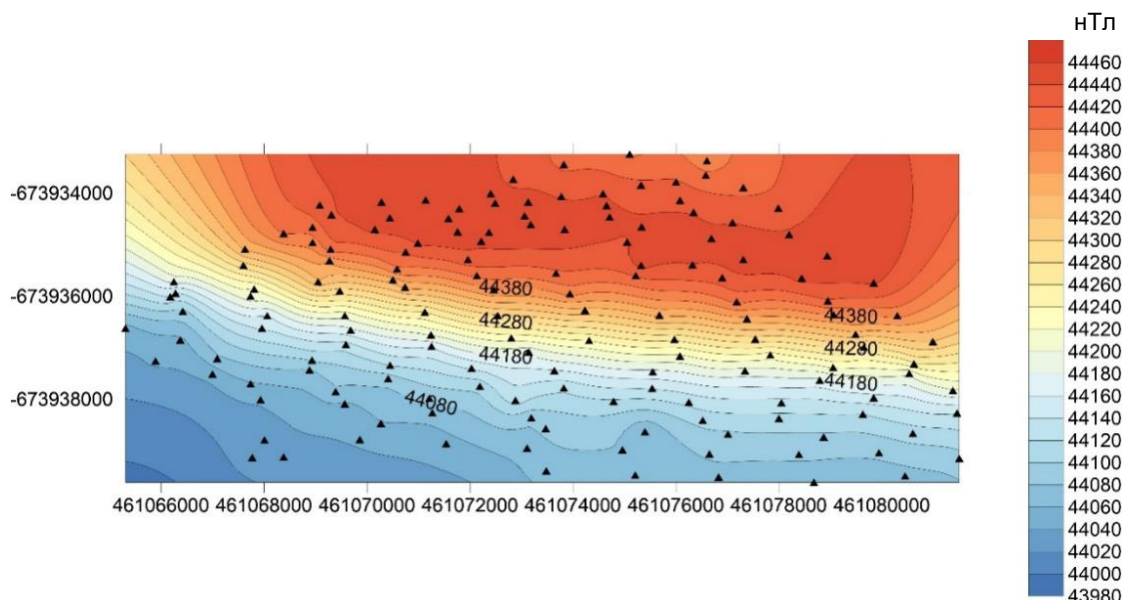


Рис. 3. Детализированный участок геомагнитного поля на морском льду моря Космонавтов, 2023 г.

Fig. 3. Detailed section of the geomagnetic field on the sea ice of the Cosmonaut Sea, 2023

Для выбора места под размещение геомагнитной станции (заложенной немагнитной тумбы), в дальнейшем – площадки для строительства немагнитного павильона, была выполнена геомагнитная съемка на участке площадью примерно $1500 \text{ м}^2 \times 1000 \text{ м}^2$, по результатам которой была выделена площадка с низкими градиентами поля, расположенная к юго-западу от места базирования БАЭ, имеющего координаты $67^\circ 33' 34,2'' \text{S}$ $046^\circ 09' 01,9'' \text{E}$ (рис. 4).

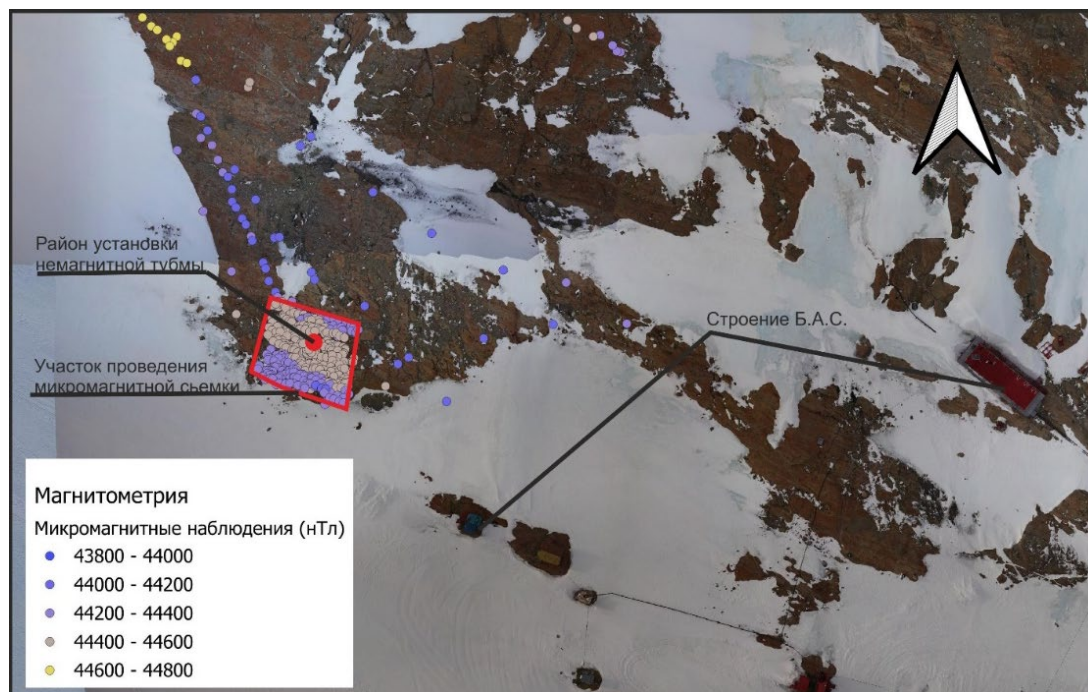


Рис. 4. Результат микромагнитной съемки территории в районе установки немагнитной тумбы, 2024 г.

Fig. 4. Micromagnetic survey results from the area of the non-magnetic pillar installation, 2024

Участок для немагнитного павильона представляет собой относительно ровную площадку на скальном массиве, хорошо продуваемую ветром и мало подверженную занесению снегом. Она находится на достаточном удалении от возможных маршрутов моторизированной техники и отстоит от

сооружений, линий электропередач и отдельных предметов, потенциально способных воздействовать на вариации геомагнитного поля.

В районе установленной немагнитной тумбы были произведены топографические работы, в задачу которых вошла разбивка квадратной поисковой микросети размером 20 м × 20 м с шагом точек 1 м × 1 м, закрепленных немагнитными колышками, каждый из которых имел координатную привязку с помощью GPS.

Затем по квадратной поисковой микросети были выполнены краткосрочные вариационные измерения для изучения короткопериодных вариаций магнитного поля (20 профилей с шагом 1 м).

Для введения поправок за вариации геомагнитного поля во времени устанавливалась локальная магнитовариационная станция в центре полигона (на месте немагнитной тумбы). Учет вариаций магнитного поля достигался путем замыкания измерений в начале и конце каждого профиля на центральную точку полигона.

Анализ представленной картосхемы показывает, что средние фоновые значения модуля вектора геомагнитного поля в районе планируемого размещения немагнитного павильона (немагнитной тумбы) находятся в диапазоне 44 400–44 600 нТл. Данные значения соответствуют региональному геомагнитному фону и свидетельствуют об отсутствии значительных аномалий, что характеризует тектоническую обстановку участка как стабильную.

Зафиксированные пространственные вариации магнитного поля амплитудой приблизительно 10 нТл на площади 400 м² являются незначительными. Наиболее вероятным источником данных микровариаций может служить поверхностное загрязнение мелкими (2–4 см в поперечнике) обломками пород, содержащими магнетит, привнесенными в результате действия временных водотоков и эоловых процессов.

В период полевых сезонов на немагнитной тумбе проводились непрерывные (исключая технические отключения) суточные вариационные измерения с периодичностью в 10 с.

Причиной суточных геомагнитных вариаций принято считать внешние источники тока, связанные с процессами магнитосферно-ионосферного взаимодействия. Под влиянием комбинации различных эффектов величина и фаза регулярной суточной вариации претерпевают изменение от суток к суткам и различаются в зависимости от места наблюдений.

Под вариациями во времени геофизических полей тектонофизического происхождения понимают изменения во времени значений наблюдаемых полей, обусловленных реакцией аномальных возмущающих тел на воздействие глубинных тектонофизических процессов, выражаемое в виде изменений во времени напряженно-деформированного состояния возмущающих поля тел и их перемещения в геологической среде, а также влияние космических явлений, прежде всего возмущающего воздействия солнечной деятельности [3].

Следует отметить, что в целях методического контроля за корректностью измерений в ходе полевых работ проводилась корреляция полученных данных с ближайшей к белорусской австралийской антарктической станцией «Моусон» (Восточная Антарктида), которая является участником мировой системы Интермагнет (Intermagnet – международная сеть магнитных обсерваторий реального времени) (рис. 5).

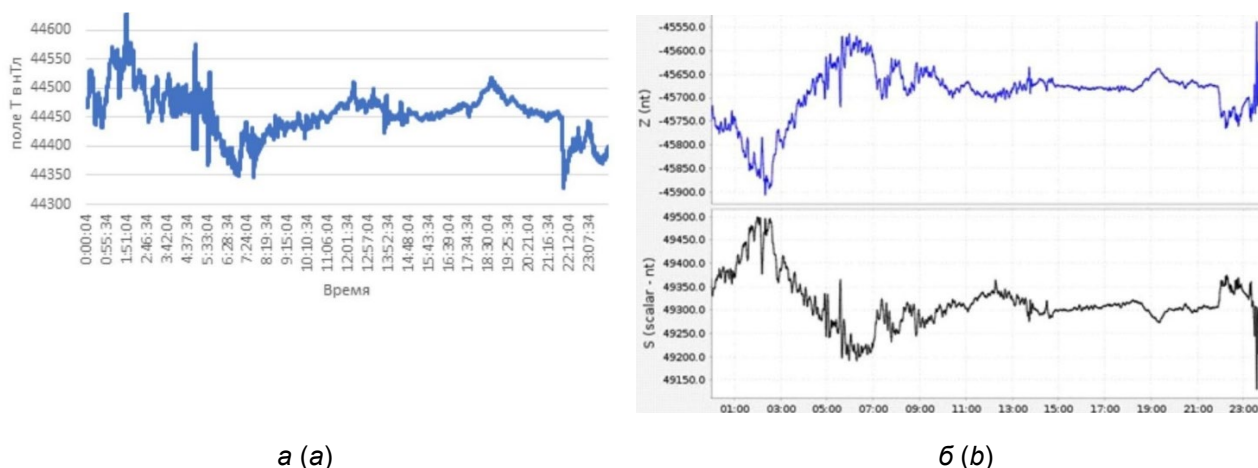


Рис. 5. Вариационный график поля T станции «Гора Вечерняя» (а) в сравнении с данными по станции «Моусон» (б), 26 ноября 2023 г.

Fig. 5. T -field variation graph at Mount Vechernyaya station (a) compared to data from the Mawson station (b), November 26, 2023

Из рис. 5 видно, что установлена четкая временная корреляция синхронного изменения магнитного поля на двух станциях. Анализ полученных данных указывает на существенное изменение магнитного поля по всем дням измерений в промежутках с 00:00 до 10:00 по всемирному координированному времени (UTC). Наибольшие вариации магнитного поля в течение дня в некоторых случаях имеют прямую связь с магнитными бурями.

Это явление требует дальнейшего изучения вместе с анализом данных за предыдущие экспедиции. На данный момент времени можно сделать предположение о связи данного явления с интенсивным проникновением в электромагнитное поле ионосферы Земли в южных высоких широтах солнечного ветра и космических лучей, что выражается в значительных суточных вариациях компоненты магнитного поля T .

Изучение временных вариаций геофизических полей позволяет изучать природные процессы, обнаруживать в земной коре современные активные глубинные разломы, оценивать их влияние на состояние здоровья человека и функционирование электротехнических средств.

Гравитационные исследования. С целью получения информации об общей картине гравитационного поля по четырем профилям с шагом 50 м в 2008–2009 гг. научным сотрудником О. В. Мясниковым были выполнены измерения приращений силы тяжести с гравиметром ГНУ-КС № 405.

Перед производством работ на профилях в стационарных условиях (в павильоне на станции «Молодежная») было проведено исследование дрейфа нуля, в результате которого установлено, что дрейф нуля этого гравиметра в климатических условиях Антарктиды устойчив во времени и составляет в среднем 0,005 мГал/мин. Горизонтальные координаты пунктов были определены с помощью системы GPS, а высоты пунктов наблюдений сняты с карты масштаба 1 : 25 000, на которой сплошные горизонталы проведены через 10 м. Всего выполнено четыре профиля с общим объемом 73 точки наблюдения (рис. 6).

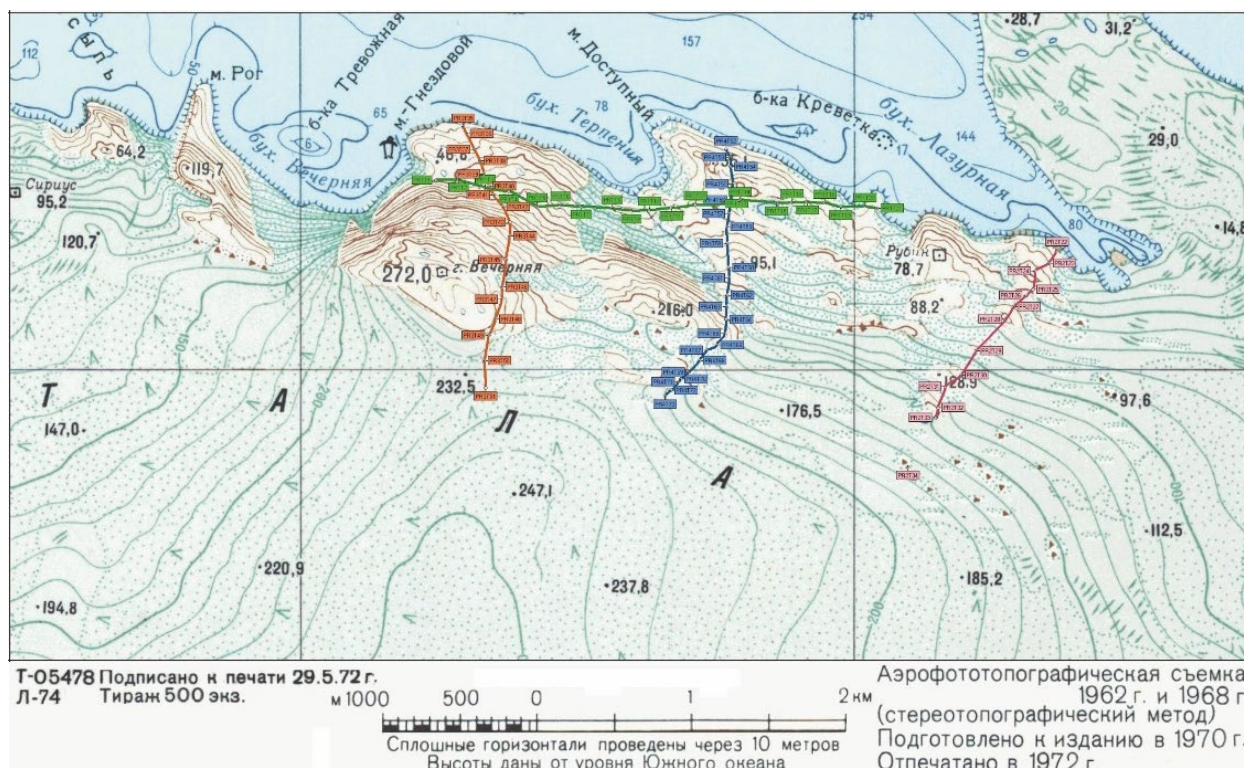


Рис. 6. Картограмма гравиметрических маршрутов Вечернегорской площади (составитель – О. В. Мясников)

Fig. 6. Gravimetric survey routes map of the Vechnegorskaya area (compiled by O. V. Myasnikov)

Для вычисления аномалий Буге в данные наблюдений были введены относительно начального пункта каждого профиля поправка за высоту ($0,3086H$) и поправка на промежуточный слой с плотностью $2,65 \text{ г/см}^3$ ($0,0419H$) в сумме $+0,1976H$, а также исключено влияние нормального поля силы тяжести, градиент которого на интервале широт $67^{\circ}39' - 67^{\circ}40'$ равен $3646,1 \text{ мГал}$ на одну градусную минуту, или $1,06 \text{ мГал/с}$.

Графики аномальной силы тяжести в редукции Буге на Вечернегорской площади сопоставляются с маршрутной геомагнитной съемкой и позволяют делать первичные выводы о тектоническом строении территории, а также создать модель прогноза тектонодинамической деформации горных пород [1].

Геологическая съемка с помощью БПЛА. В 2022–2024 гг. в ходе 15-го и 16-го полевых сезонов на Вечернегорской площади в Антарктиде был использован БПЛА *гексокоптер* A20-X, позволивший выполнить фотовидеофиксации территории с воздуха с последующим построением 3D модели, и ортофотоплана местности и инфраструктуры для решения ряда научно-практических задач, в том числе для уточнения данных площадной геологической и геомагнитной съемок.

Съемка для создания подробного ортофотоплана местности в среднем производилась с высоты 150 м от поверхности моря. Каждый полет длился от 30 до 45 мин. За один вылет гексокоптер облетал территорию в 1 км² и делал более 100 снимков. Обработка полученных данных приосходила в программе Metashape Agisoft.

В рамках работ съемочные работы были произведены для территории всей Вечернегорской площади (рис. 7).

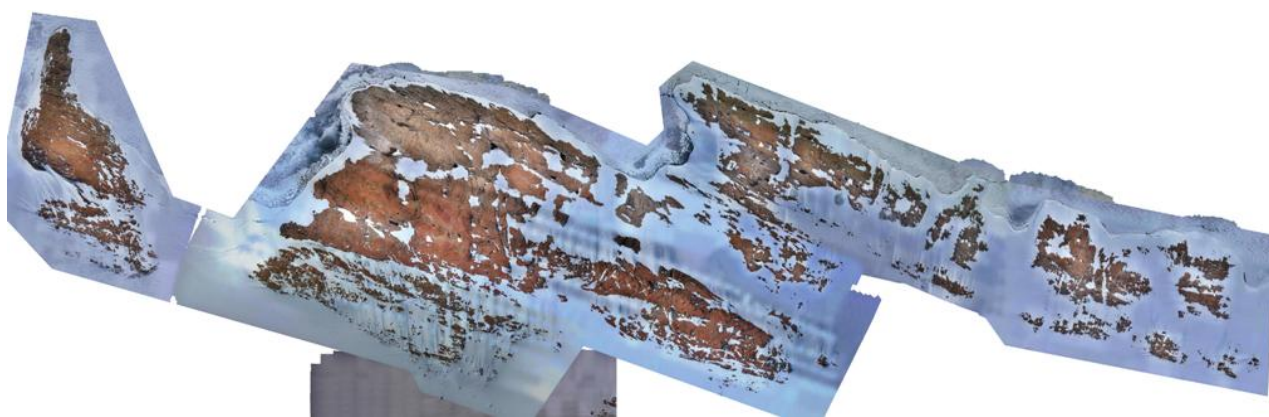


Рис. 7. Ортофотоплан Вечернегорской площади, построенный в программе QGIS

Fig. 7. Orthophoto map of the Vechernegorskaya area generated using QGIS software

По окончании маршрутных наблюдений исполнителями работ были проведены площадные аэрогеологические работы, направленные на изучение всей территории Вечернегорской площади и прилегающих территорий для получения детализированных данных о геологическом строении поверхности.

Комплексная интерпретация геологических и геофизических данных вместе с дешифрированием данных аэрофотосъемок позволяет существенно уточнить геологическое строение территории, понять пространственное положение геологических структур, а также стать основой для более углубленного изучения интрузивных тел и разломов. На примере исследуемого участка «гора Рубин» было проведено дешифрирование аэрофотоматериалов, что позволило построить детальную геологическую картосхему района исследования (рис. 8).

Использование БПЛА также существенно расширило возможности исследований, обеспечив доступ к ранее недоступным для изучения участкам. Ярким примером стало детальное обследование островов Мак-Махон, расположенных примерно в 1 км от береговой линии к западу от основной исследуемой территории (рис. 9). Предыдущие исследования в этом районе были крайне ограничены и проводились более двух десятилетий назад.

Проведенная с помощью БПЛА высокодетальная съемка позволила выявить и точно картировать многочисленные дайки, трещиноватости и другие тектонические элементы. Полученные данные дают возможность проанализировать пространственное распределение разрывных нарушений и определить их роль в современной структуре региона. Данная съемка дает новые перспективы для понимания геодинамической эволюции территории и устанавливает принципиально новый уровень детальности геологических исследований в антарктических условиях.

Особую ценность представляет возможность документирования и измерения элементов залегания тектонических структур в труднодоступных прибрежных обнажениях, что значительно повышает достоверность геодинамических реконструкций.

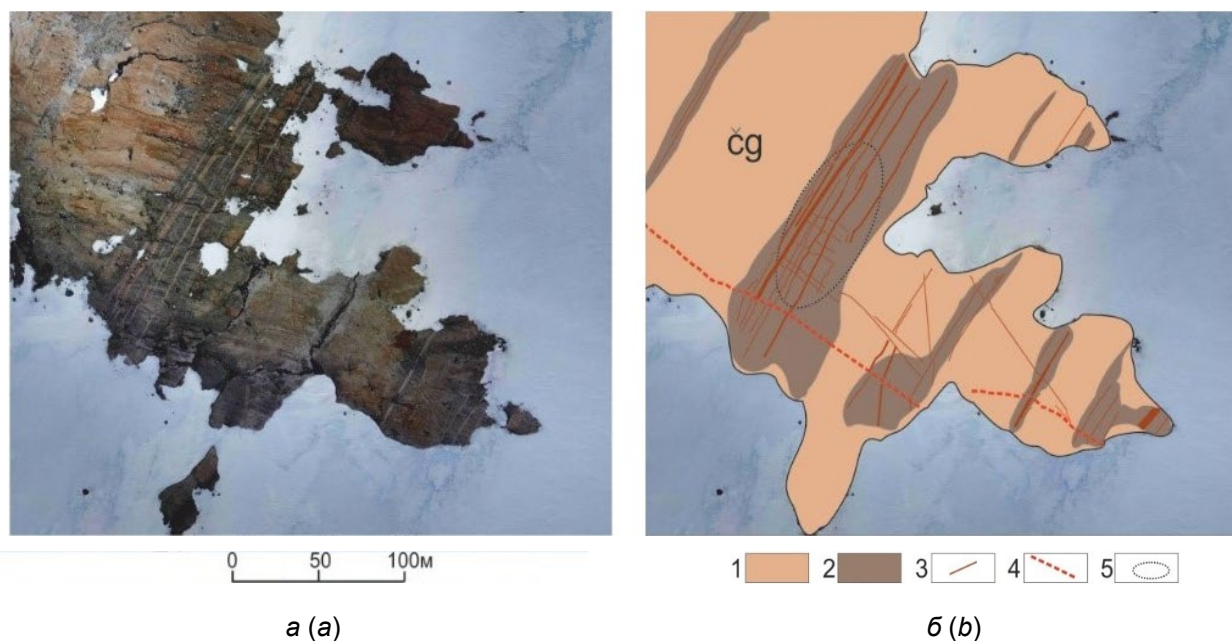


Рис. 8. Ортофотоплан участка «Гора Рубин» (а) и петрографическая характеристика (б) горных пород (интерпретатор – С. Л. Сушкевич): 1 – Cg – чарнокиты (эндербо-чарнокиты) среднего протерозоя; 2 – зоны приконтактового изменения вмещающих пород; 3 – дайковые, дайково-жильные тела; 4 – разломы; 5 – зоны дробления

Fig. 8. Orthophoto map of the Mount Rubin site (a) and petrographic characteristics (b) of the rocks (interpreter – S. L. Sushkevich): 1 – Cg – charnockites (Enderby-land charnockites) of the Middle Proterozoic; 2 – zones of contact metamorphism in the host rocks; 3 – dike and vein-dike bodies; 4 – faults; 5 – fracture zones

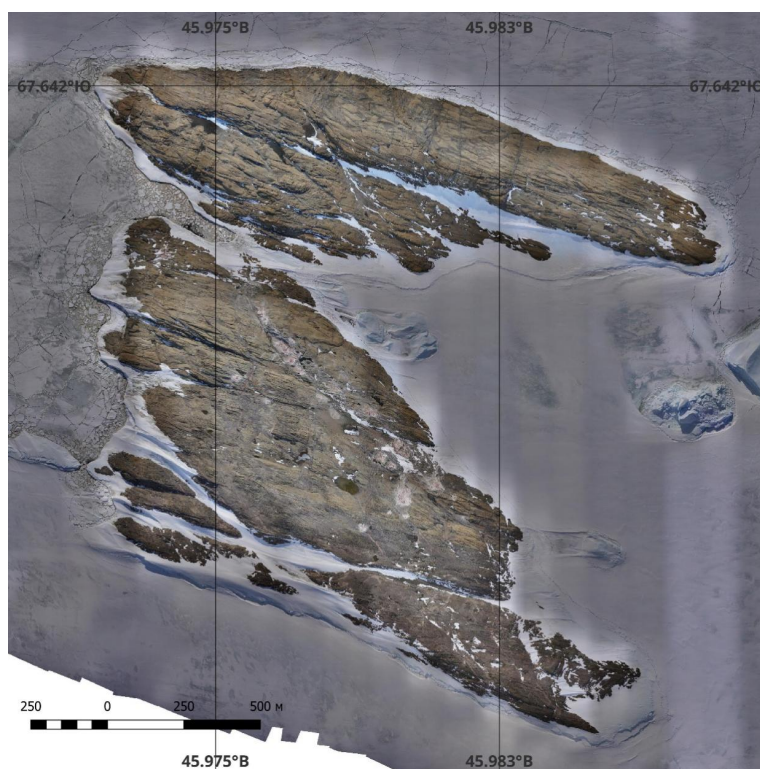


Рис. 9. Ортофотоплан островов Мак-Махон

Fig. 9. Orthophoto map of the McMahon Islands

Радиометрические и спектрометрические исследования. Маршрутные радиометрические исследования выполнены на территории Вечернегорской площади вкrest простираения блоков кристаллических пород с использованием радиометра СРП-68-01. Полученные данные демонстрируют, что средние значения естественного гамма-фона пород изучаемой территории варьируются в диапазоне от 5 до 14 мкР/ч [5].

На всех точках наблюдения выполнялась GPS-привязка с занесением координат в полевой журнал, сопровождаемая фотофиксацией и кратким геологическим описанием локаций. При выявлении аномальных показателей гамма-поля проводилось детальное обследование соответствующих участков.

На участках с наиболее значительными аномалиями радиоактивного поля выполнена спектрометрическая съемка мобильным гамма-спектрометром МКС-АТ6101ДР. Профилирование осуществлялось вкrest простираения жильных образований и разломных зон с шагом от 5 до 50 м, с адаптацией методики картирования к линейным размерам объектов и условиям пешей доступности. В ходе измерений исключалось влияние естественных радионуклидов, аккумулированных в снежном покрове. Время измерений на каждой точке составляло от 10 до 20 мин, при этом устанавливалась стандартная плотность подстилающих скальных пород 2800 кг/м³.

В процессе работы прибора регистрируется гамма-спектр, где по горизонтальной оси откладываются значения энергий, а по вертикальной оси – количество зарегистрированных импульсов. Полученные спектры позволяют идентифицировать радионуклидный состав пород и количественно оценить концентрации природных радиоактивных элементов.

В пределах природно-территориального комплекса «Гора Вечерняя» выявлены аномалии по радионуклидам К-40 и Ra-226 в районе с. Рубин со значениями 977 и 313 Бк/кг соответственно. Аномальное значение по Th-232 обнаружено в районе мыса «Без названия» – 801 Бк/кг.

После обработки полевых данных радиометрии построена предварительная картосхема интенсивности замеренного гамма-поля Вечернегорской площади (рис. 10).

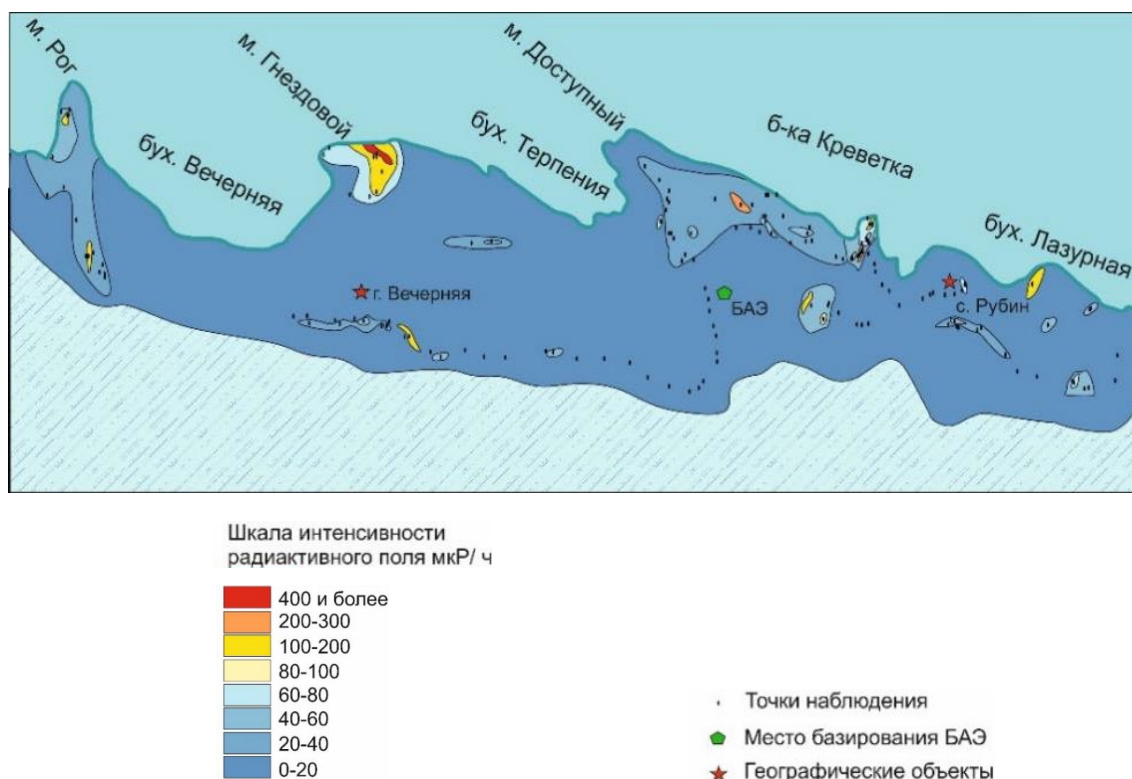


Рис. 10. Радиометрическая карта по данным сезона 2021–2022 гг.

Fig. 10. Radiometric map based on data from the 2021–2022 field season

Повышенные значения радиоактивного поля демонстрируют прямую корреляцию с выходами архейских пород. Интенсивность радиоактивного поля в отдельных случаях достигает 200–300 мкР/ч и выше, составляя в среднем 60–100 мкР/ч. Высокие показатели гамма-фона в гранитоидных дайках могут быть обусловлены повышенной радиоактивностью минералов, содержащих калий, уран и торий, что требует проведения дополнительных лабораторных петрогеохимических исследований.

Полученные данные радиометрических и спектрометрических исследований позволяют уточнить геологическое строение территории и оценить ее минерагенический потенциал. Выявленная связь аномальных зон радиоактивного и магнитного полей с тектоническими структурами способствует более точному определению границ тектонических элементов. Проведение спектрометрической съемки в рамках рекогносцировочных маршрутных исследований позволяет установить генетическую связь геофизических гамма-аномалий с вещественным составом пород.

Опытное шлиховое опробование. Шлиховой метод геологических и геохимических исследований играет существенную роль при поисках как россыпей, так и некоторых типов коренных месторождений. Считается, что шлиховое опробование является одним из ведущих методов при поисках месторождений редких металлов, титана, хрома, никеля, платины, цветных металлов (Sn, W, Hg), золота, лития, бериллия и алмазов [6]. Этот вид опробования при незначительных затратах и достаточном оборудовании позволяет определить минеральный состав горных пород района.

Шлих составляют зерна минералов плотностью свыше 3000 кг/м^3 , устойчивых к физическому и химическому выветриванию. Получение шлиха лежит в основе шлихового метода – одного из древнейших минералогических методов поиска коренных и россыпных месторождений алмазов, золота, платины, олова, вольфрама, ртути, титана, ювелирного сырья, абразивных минералов (корунда, гранатов), флюорита, барита и др.

План работ предусматривал шлиховое опробование двух перспективных участков с целью уточнения контуров распространения литохимических ореолов железо-титановой минерализации Вечернегорской структуры.

Учитывая материалы ранее проведенных исследований (Мясников, Каратаев и др.) [7] о перспективах Вечернегорской структуры в отношении полезных ископаемых и физико-географических условий территории, были выделены участки для работ (рис. 11).

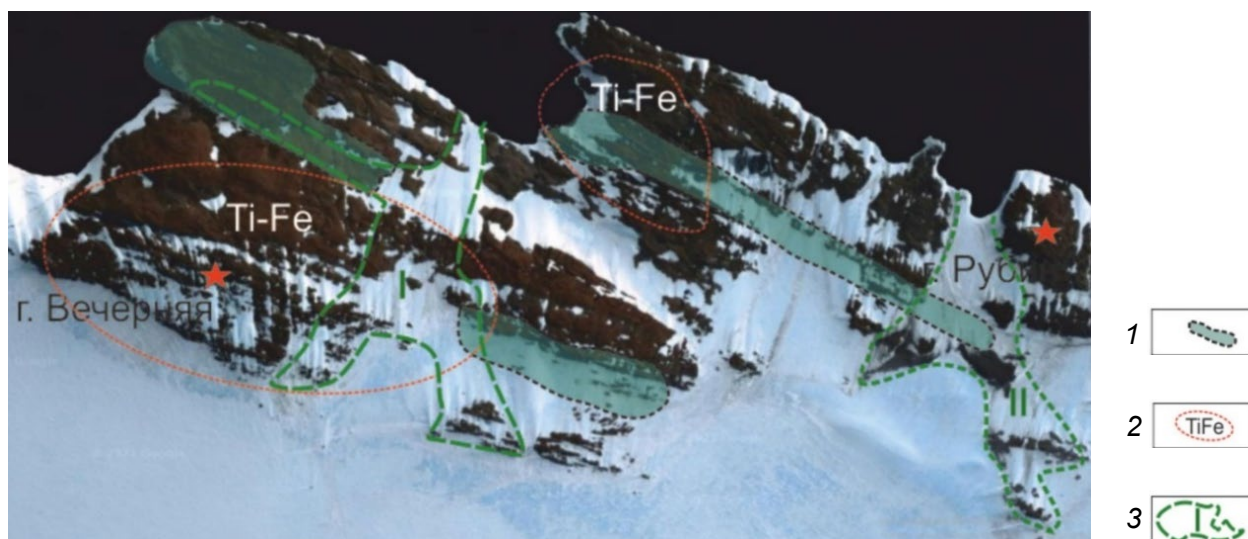


Рис. 11. Картограмма участков для шлихового опробования:
1 – перспективные участки на полезные ископаемые; 2 – литохимические ореолы железо-титановой минерализации по геофизическим данным; 3 – участки шлиховой съемки

Fig. 11. Schematic map of sampling sites for heavy mineral concentrate surveys:
1 – prospective areas for mineral resources; 2 – lithochemical halos of iron-titanium mineralization based on geophysical data; 3 – heavy mineral survey sites

Результаты минералогических исследований шлихов обработки аналитических данных являются основой для составления различных типов шлиховых карт и специализированных графических материалов. Главное назначение этих карт – дать наглядное представление о пространственном размещении в разновозрастных рыхлых отложениях различных генетических типов полезных компонентов и их типоморфных спутников, оконтурить и установить их возможные связи с коренными образованиями, т. е. уточнить геологическое строение территории и выявить перспективы на обнаружение коренных или россыпных месторождений полезных ископаемых.

Опробование выполнялось на прибрежных участках с учетом геоморфологических условий. Пробы отбирались из рыхлых отложений, после чего проводилась их промывка для получения серого шлиха (с сохранением легких минералов-индикаторов).

Проведение площадной каппаметрической съемки. Сущность метода каппаметрии заключается в измерении магнитной восприимчивости проб (χ), что позволяет оценить содержание ферромагнитных минералов в горных породах. Этот параметр используется при поиске месторождений, изучении геологического строения, оконтуривании рудных тел и анализе ореолов рассеивания.

Магнитная восприимчивость (χ) – безразмерная величина, связывающая намагниченность вещества (M) с напряженностью магнитного поля (H). По магнитным свойствам породы делятся на *диамагнитные* ($\chi \approx 10^{-5} \dots 10^{-6}$; например: кварц, золото), *парамагнитные* (большинство осадочных и магматических пород) и *ферромагнитные* (χ до нескольких единиц СИ; например: магнетит, ильменит).

Полевые работы на Вечернегорской площади включали отбор проб из коренных пород в зонах с аномальными геофизическими полями. Измерения проводились в лаборатории с использованием астатического *магнитометра* МА-21 и метода гидростатического взвешивания для определения плотности. Дополнительно вычислялся *фактор Кёнигсбергера* (Q), отражающий соотношение остаточной и индуцированной намагниченности.

Лабораторные исследования выявили значительную *анизотропию магнитных свойств* пород, что исключило построение классических изолиний. Вместо этого был применен *блочный метод*, разделяющий территорию на зоны с близкими петрофизическими характеристиками. Выделены следующие основные блоки: 1) архейские плагиогнейсы – высокая плотность, слабая намагниченность; 2) эндебито-чарнокиты – средняя плотность, повышенная намагниченность; 3) чарнокиты – минимальная плотность, высокая энергия и намагниченность; 4) рапакивиподобные чарнокиты – пониженные плотность и энергия.

По результатам установлены аномальные значения (χ до $72\,500 \cdot 10^{-6}$ СГС), которые соответствуют зонам титано-железистой минерализации. *Отсутствие прямой корреляции* между магнитной восприимчивостью и полем T объясняется влиянием длительных геомагнитных процессов.

Графические материалы – карты остаточной намагниченности (рис. 12) и магнитной восприимчивости (рис. 13) – подтверждают неоднородность петрофизических свойств, что важно для прогнозирования рудных зон. Метод блочного анализа признан наиболее репрезентативным для сложно построенных территорий.

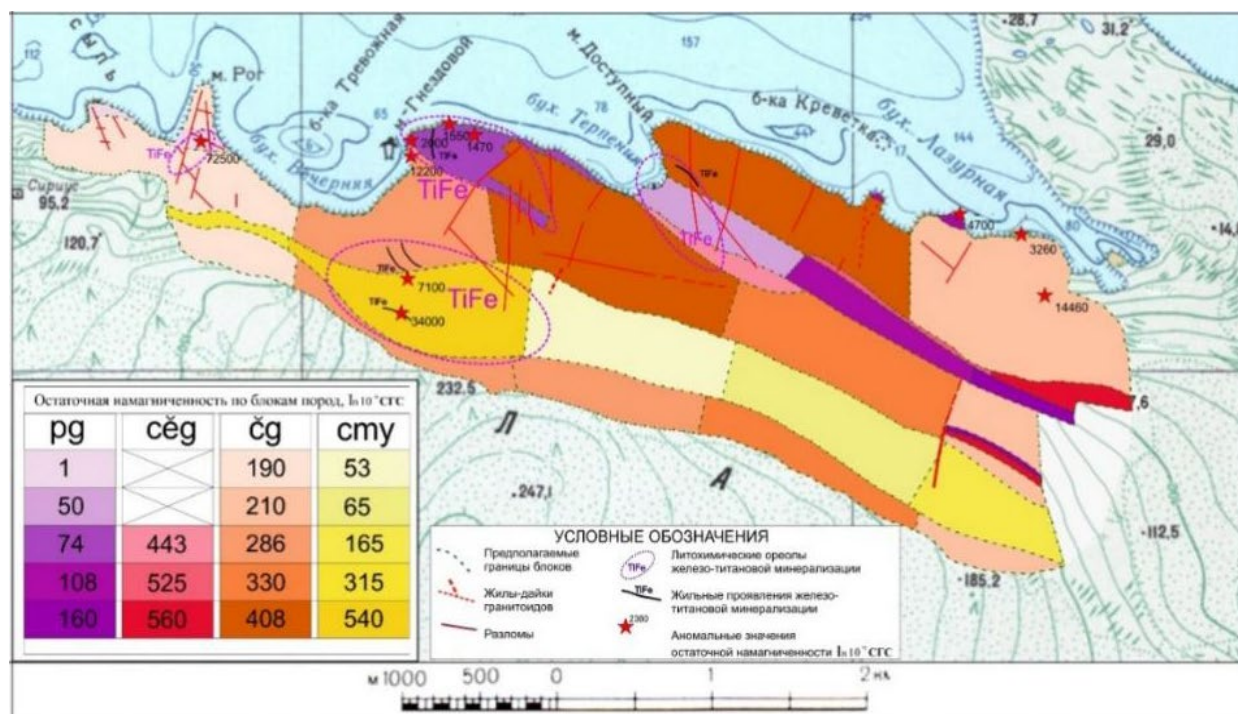


Рис. 12. Карта остаточной намагниченности ($I_n \cdot 10^{-6}$ СГС) горных пород Вечернегорской площади (составитель – С. Л. Сушкевич): Pg – архейские плагиогнейсы; Ceg – эндебиты гибридные чарнокитизированные палеопротерозоя; Cg – чарнокиты (эндебито-чарнокиты) мезопротерозоя; Cmy – чарнокиты гнейсовато рапакивиподобные неопротерозоя

Fig. 12. Map of residual magnetization ($I_n \cdot 10^{-6}$ CGS) of rocks in the Vechernegorskaya area (compiled by S. L. Sushkevich): Pg – archaic plagiogneisses; Ceg – Paleoproterozoic hybrid charnockitized enderbites; Cg – Mesoproterozoic charnockites (Enderby-land charnockites); Cmy – Neoproterozoic gneissic rapakivi-like charnockites

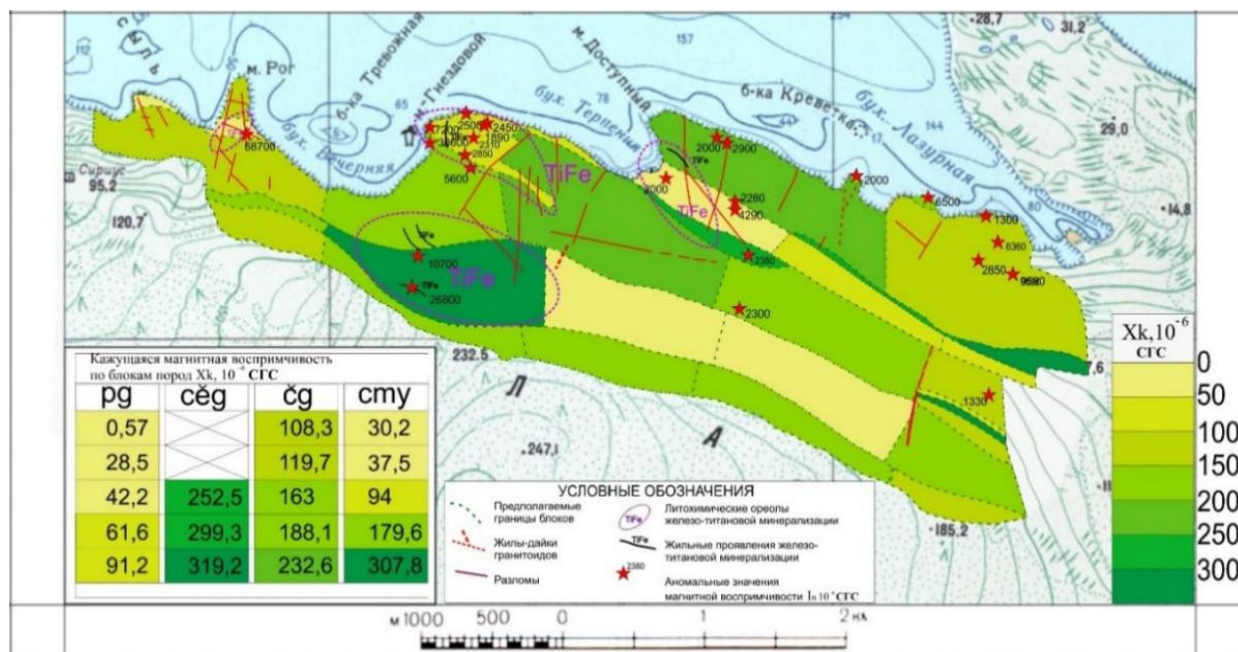


Рис. 13. Карта магнитной восприимчивости ($X_k \cdot 10^{-6}$ СГС) горных пород Вечернегорской площади (составитель – С. Л. Сушкевич): Pg – архейские плагиогнейсы; Ceg – эндербиты гибридные чарнокитизированные палеопротерозоя; Cg – чарнокиты (эндербо-чарнокиты) мезопротерозоя; Cmy – чарнокиты гнейсовато рапакивиподобные неопротерозоя

Fig. 13. Magnetic susceptibility map ($X_k \cdot 10^{-6}$ CGS) of rocks in the Vechernegorskaya area (compiled by S. L. Sushkevich): Pg – Archean plagiogneisses; Ceg – Paleoproterozoic hybrid charnockitized enderbites; Cg – Mesoproterozoic charnockites (Enderby-land charnockites); Cmy – Neoproterozoic gneissic rapakivi-like charnockites

Лабораторные исследования работ этапа анализируемого периода включают:

- лабораторный анализ шлиховых образцов пород;
- микроскопическое описание и определение минерального состава пород по шлифам;
- минералого-петрографическую характеристику образцов горных пород.

Приведем кратко результаты лабораторных исследований.

Лабораторный анализ шлиховых образцов.

Этапы промывки:

- пробуртка – удаление глинистых частиц и крупных обломков;
- промывка в лотке – разделение минералов по плотности;
- доводка – получение концентрата тяжелых минералов.

Минералогические исследования проводились под микроскопом *Zeiss Primo Star* с определением качественного и количественного состава шлихов. Основные методы: качественный анализ – идентификация минералов; количественный анализ – оценка содержания полезных компонентов.

В шлихах обнаружены магнетит, ильменит (Fe-Ti минералы); галенит, халькопирит (сульфиды); гранат, эпидот, пирротин (минералы-спутники) (рис. 14).

Результаты и картографирование. Особенности участков.

Участок I: преобладают чарнокитизированные эндербиты и плагиогнейсы; содержание магнитной фракции – 9–24 %.

Участок II: более глинистые отложения; магнитная фракция – 13–33 %.

Шлиховые карты. В результате проведенных исследований были составлены карты с отображением точек отбора проб, процентного содержания магнитной фракции и направлений сноса обломочного материала. Подобного рода карты позволяют выделить зоны с аномальным содержанием рудных минералов и установить связь с коренными источниками.

Микроскопическое описание и определение минерального состава пород по шлифам.

Проведены макро- и микроскопические исследования шлифов и дана полная минералого-петрографическая характеристика серии исследуемых образцов в филиале «Институт геологии» государственного предприятия «НПЦ по геологии» кандидатом геолого-минералогических наук М. П. Гуринович, а также научным сотрудником О. А. Пискуном. Ниже приводится выборочное описание определения минерального состава пород (рис. 15).

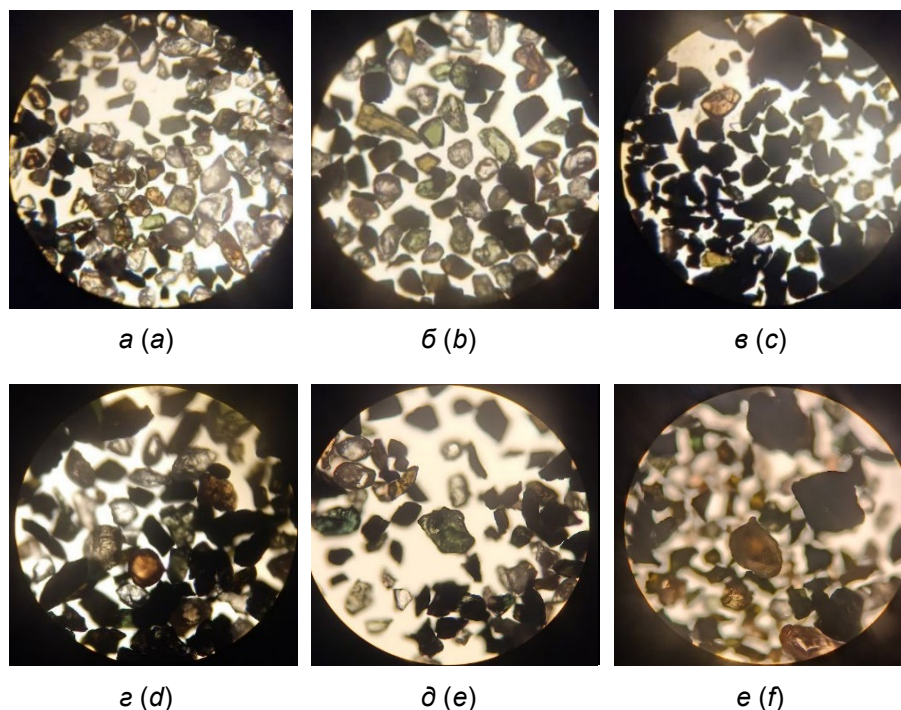


Рис. 14. Минералы шлиховых проб в бинокляре, $\times 10$:

a – галенит, халькопирит, магнетит; *б* – эпидот, гранат, кварц; *в* – магнетит, ильменит, гранат;
г – гранат, эпидот, ильменит; *д* – эпидот, гранат, пирротин; *е* – гранат, пирротин, ильменит

Fig. 14. Heavy mineral concentrate samples under a binocular microscope, $\times 10$ magnification:
a – galena, chalcopyrite, magnetite; *b* – epidote, garnet, quartz; *c* – magnetite, ilmenite, garnet;
d – garnet, epidote, ilmenite; *e* – epidote, garnet, pyrrhotite; *f* – garnet, pyrrhotite, ilmenite

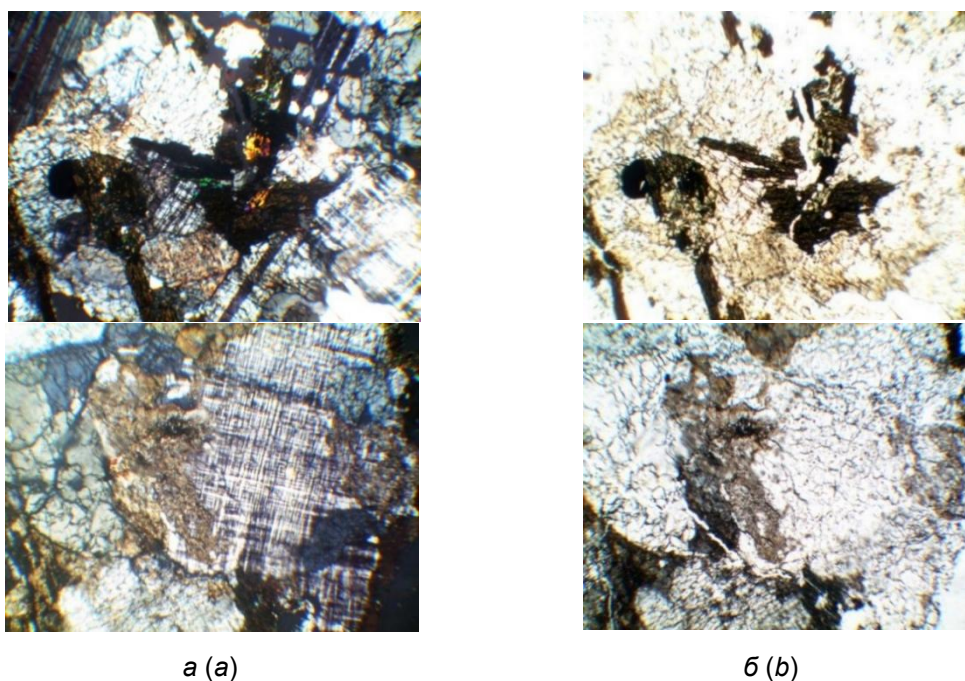


Рис. 15. Образец № 14 – гранитогнейс (мigmatит): *a* – с анализатором; *б* – без анализатора.
 Размер видимого поля шлифа – 3,0 мм $\times$ 2,5 мм

Fig. 15. Sample No. 14 – Granite-gneiss (migmatite): *a* – with analyzer; *b* – without analyzer.
 Thin section field of view – 3.0 mm $\times$ 2.5 mm

Образец № 14.

Макроскопическое описание. Мелко- и среднезернистая порода розовато-серого цвета, которая представляет собой чередование светло- и темноокрашенных прослоев, придающих породе полосчатую текстуру. На спиле отмечается наличие порфиробластовых выделений бледно-розового калиевого полевого шпата, округлой и линзовидной формы.

Микроскопическое описание. Название породы (уточненное): гранитогнейс (мigmatит). Текстура породы: полосчатая. Структура: порфиробластовая.

Минеральный состав: калиевый полевой шпат – 35–45 %; плагиоклаз – 30–35; биотит – 10–15; кварц – 15–20; рудный минерал – <1; эпидот – 1; сфен – <1; циркон – <1 %; вторичные минералы – серицит-пелитовый материал.

Калиевый полевой шпат представлен *микроклином*. Это образования неправильной таблитчатой формы с четким решетчатым строением, размер которых не превышает 2,0–2,5 мм (в шлифах). Микроклин сильно трещиноват и замещен вторичными минералами.

Плагиоклаз – *олигоклаз-андезин*. Формирует таблитчатые, чаще неправильные таблитчатые зерна. Размер отдельных индивидов варьирует от 0,3–0,5 до 2,0–2,5 мм. Часть зерен сильно затронуты вторичными изменениями и замещены пелитом, серицитом и эпидотом. Полисинтетические двойники наблюдаются лишь в зернах, менее затронутых изменениями.

Биотит представлен мелкими чешуйками, размер которых варьирует от 0,1–0,2 до 0,5–0,6 мм. Плеохроирует от буровато-коричневого по Nr до темно-бурого, почти черного цвета по Ng. По породе распределен неравномерно, образуя ассоциации с рудными и акцессорными минералами.

Кварц формирует трещиноватые бесформенные зерна размером от мельчайших включений до 1,5–2,0 мм. Встречен как одиночными зернами в интерстициях полевых шпатов, либо включений в них, так и довольно крупными скоплениями.

Рудный минерал представлен *магнетитом*. Формирует зерна неправильной формы размером до 0,2–0,3 мм в ассоциации с биотитом.

Эпидот представлен зернами бледно-зеленого цвета, формирующими небольшие скопления из мелких 0,1–0,2 мм комковатых зерен. Реже встречаются индивиды до 1,0 мм. Чаще наблюдается в ассоциации с биотитом, но также развивается по плагиоклазу.

Сфен встречен в виде буровато-коричневых зерен неправильной, комковатой формы размером до 0,5 мм. Выделения наблюдаются в ассоциации с биотитом и эпидотом.

Циркон присутствует в виде единичных округлых зерен, включенных в биотит размером до 0,1 мм.

По минералого-петрографической характеристике образцов устанавливается сравнительная характеристика макро- и микроописания горных пород по соответствию породного компонента. По серии образцов установлен высокий уровень первичной характеристики, составляющий до 80 % лабораторного исследования.

На всех изученных участках породы представлены преимущественно гранитогнейсами, гнидами и монцонитами. Характеризуются в большинстве своем однородным составом, за исключением единичных образцов [8].

Петрографическое определение пород вкупе с полученными петрофизическими характеристиками является базой для построения комплекта материалов по минерагенической составляющей горных пород.

Выводы. На протяжении полевых этапов антарктических экспедиций опробован комплекс геолого-геофизических исследований, направленный на геологическое исследование недр Вечернегорской площади. Методика работ и применяемая приборная база апробировались последовательно, затем по результатам эффективности методов принималось решение о совершенствовании применяемого метода по методике полевых работ, интерпретации результатов и результативности в выполнении основной задачи. Таким образом, можно кратко проанализировать полученные результаты и отметить результативность апробированных геолого-геофизических методов.

1. **Геоманитная съемка** подтвердила свою результативную роль в картировании геологических структур разнотипного состава. Высокоточная детальная съемка позволяет оконтуривать геоманитные аномалии, приуроченные к тектоническим разломам, интрузивным дайковым комплексам, на обнаженных участках суши Вечернегорской площади, районов горных массивов при экспедиционных походах Земли Эндерби, в условиях Западной Антарктики на острове Ливингстон (оазис Болгарский пляж), прибрежной части моря Космонавтов по морскому льду. В перспективе представляется целесообразным изучение геоманитных характеристик прибрежных подледных новых участков Вечернегорской площади.

2. **Вариации геоманитного поля** характеризуют мониторинг геоманитного поля в условиях стационарного пункта для последующего учета вариаций геоманитного поля с глобальными процессами, учитываемых при интерпретации маршрутной геоманитной съемки и динамики геоманитного поля. В дальнейшем исследования следует продолжить на базе планируемого к сооружению немагнитного павильона.

3. *Гравиметрические исследования* выполнены в ограниченном объеме на Вечернегорской площади, и в отдельных фрагментах разреза установлена взаимосвязь регистрируемого параметра с плитностной неоднородностью фундамента. Полученные данные в определенной степени согласуются с данными по магниторазведке. В перспективе использование гравиметрических исследований представляется реальным при корректировке средств и методов полевых исследований.

4. *Съемка на базе БПЛА* представляется прогрессивным методом с учетом комплексирования с наземными геофизическими методами, особенно для труднодоступных районов в антарктических условиях. Метод позволяет создать детальные ортофотопланы территории и модели поверхности выхода коренных пород, на которых представляются элементы картирования разломной тектоники. Планируется в перспективе расширение использования БПЛА с комплексированием с аппаратурой по регистрации других геофизико-геохимических параметров.

5. *Радиометрические и спектрометрические исследования.* Радиометрические исследования по гаммаактивности представляют карту распределения горных пород по общей гаммаактивности, что определяет выявление их аномальных участков для последующей детализации с идентификацией источников гамма-излучения по K-40, Ra-226, Th-232. Такая привязка по элементному составу определяет конкретные типы горных пород и их минеральную составляющую, а также тектонофизическую эволюцию.

6. *Шлиховое опробование.* Выполнены опытные исследования в пределах Вечернегорской площади, что является весьма неординарным исследованием для полярных условий. Шлиховое опробование традиционно применяется при изучении аллювиальных формаций палео- и современных речных бассейнов. Для полярного региона эти исследования могут представлять интерес как локализованный участок с ограниченным водотоком сезонного характера и закрытыми в его верховой части ледниковыми образованиями.

7. По результатам лабораторного анализа в шлихах установлены элементы магнитной фракции горных пород, что является косвенным признаком соответствующей минерагении вышележающих горных пород.

8. *Каппаметрические исследования* позволяют выполнять определение магнитной восприимчивости непосредственно горных пород по профильному исполнению для вещественной интерпретации геофизических аномалий. Выявление зон и участков с петрофизическими магнит-восприимчивыми элементами состава определяют реальную возможность оконтуривания рудных зон.

9. *Лабораторные исследования* образцов горных пород содержат состав, составляющие компоненты пород, их минеральный состав, петрофизические особенности для использования при интерпретации геофизических исследований и определения минерагенических особенностей.

10. Продолжение лабораторных исследований последующих этапов включает определение минерагенического компонента горной породы как элемента полезного ископаемого, связанного с эволюцией формирования слоев земной коры.

Список использованных источников

1. Мясников, О. В. Геология и петрография участка гора Вечерняя (холмы Тала) / О. В. Мясников // Научные результаты российских геолого-геофизических исследований в Антарктике. – СПб., 2011. – Вып. 3. – С. 37–59.
2. Шаблыко, П. В. Геофизические исследования в районе Горы Вечерняя, Восточная Антарктида, Земля Эндерби / П. В. Шаблыко, А. К. Хибиев, С. Л. Сушкевич // Природная среда Антарктики: экологические проблемы и охрана : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Учебный центр «Форум», Беларусь, 17–19 сент. 2018 г. – Минск, 2018. – С. 350–353.
3. Каратаев, Г. И. Аномальное магнитное поле в зоне Белорусской антарктической станции / Г. И. Каратаев, С. В. Голобоков, П. В. Шаблыко, А. К. Хибиев // Літасфера. – 2018. – № 2 (49). – С. 137–144.
4. Каратаев, Г. И. Методика построения физико-геологического разреза по комплексу геофизических полей / Г. И. Каратаев, С. В. Голобоков // Літасфера. – 2003. – № 2 (19). – С. 74–84.
5. Новиков, Г. Ф. Радиометрическая разведка : учебник для вузов / Г. Ф. Новиков. – Л. : Недра, 1989. – 418 с.
6. Бакулина, Л. П. Шлиховое опробование и анализ шлиховых проб / Л. П. Бакулина. – Ухта : УГТУ, 2014. – 126 с.
7. Тектоническое районирование фундамента Земли Эндерби (Восточная Антарктида) / Р. Г. Гарецкий, Г. И. Каратаев, И. В. Данкевич, О. В. Мясников // Современное состояние наук о Земле : материалы Междунар. конф., посвящ. памяти В. Е. Хаина. – М. : Изд-во МГУ, 2011. – С. 824–829.
8. Гарецкий, Р. Г. Глубинное строение и тектоника Земли Эндерби (Восточная Антарктида) / Р. Г. Гарецкий, Г. И. Каратаев // Мониторинг состояния природной среды Антарктики и обеспечение деятельности национальных экспедиций : материалы 1-й Междунар. науч.-практ. конф., к. п. Нарочь, Беларусь, 26–29 мая 2014 г. – Минск : Экоперспектива, 2014. – С. 41–46.

References

1. Myasnikov O. V. *Geologiya i petrografiya uchastka gora Vechernyaya (holmy Tala)* [Geology and Petrography of the Mount Vechernyaya Area (Tala Hills)]. *Nauchnye rezultaty rossijskikh geologo-geofizicheskikh issledovanij v Antarktike* [Scientific results of Russian geological and geophysical research in Antarctica], Sankt-Peterburg, 2011, iss. 3, pp. 37–59. (in Russian)
2. Shablyko P. V., Hibiev A. K., Sushkevich S. L. *Geofizicheskie issledovaniya v rajone Gory Vechernyaya, Vostochnaya Antarktida, Zemlya Enderbi* [Geophysical research in the Mount Vechernyaya Area, East Antarctica, Enderby Land]. *Prirodnaya sreda Antarktiki: ekologicheskie problemy i ohrana: Materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Uchebnyj centr "Forum", Belarus', 17–19 sentyabrya 2018* [Antarctic environment: Environmental problems and conservation: Proceedings of the III International scientific and practical conference. Training Center "Forum", Belarus, September 17–19, 2018]. Minsk, 2018, pp.350–353. (in Russian)
3. Karataev G. I., Golobokov S. V., Shablyko P. V., Hibiev A. K. *Anomal'noe magnitnoe pole v zone Belorusskoj antarkticheskoy stancii* [Anomalous magnetic field in the zone of the Belarusian Antarctic station]. *Litasfera = Lithosphere*, 2018, no. 2 (49), pp. 137–144. (in Russian)
4. Karataev G. I., Golobokov S. V. *Metodika postroeniya fiziko-geologicheskogo razreza po kompleksu geofizicheskikh polej* [Methodology for constructing a physical-geological section based on a complex of geophysical fields]. *Litasfera = Lithosphere*, 2003, no. 2 (19), pp. 74–84. (in Russian)
5. Novikov G. F. *Radiometricheskaya razvedka: uchebnyk dlya vuzov* [Radiometric exploration: A textbook for universities]. Leningrad, Nedra Publ., 1989, 418 p. (in Russian)
6. Bakulina L. P. *Shlihovoe oprobovanie i analiz shlihovyyh prob* [Heavy mineral sampling and analysis of heavy mineral concentrates]. Uhta, UGTU Publ., 2014, 126 p. (in Russian)
7. Gareckij R. G., Karataev G. I., Dankevich I. V., Myasnikov O. V. *Tektonicheskoe rajonirovanie fundamenta Zemli Enderbi (Vostochnaya Antarktida)* [Tectonic zoning of the Enderby Land basement (East Antarctica)]. *Sovremennoe sostoyanie nauk o Zemle. Materialy Mezhdunarodnoj konferencii, posvyashchennoj pamyati V. E. Haina* [Current state of the Earth sciences. Proceedings of the International conference, dedicated to the memory of V. E. Khain]. Moscow, MGU Publ., 2011, pp. 824–829. (in Russian)
8. Gareckij R. G., Karataev G. I. *Glubinnoe stroenie i tektonika Zemli Enderbi (Vostochnaya Antarktida)* [Deep Structure and Tectonics of Enderby Land (East Antarctica)]. *Monitoring sostoyaniya prirodnoy sredy Antarktiki i obespechenie deyatelnosti nacional'nyh ekspeditsij. Materialy 1-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, k. p. Naroch'. Belarus', 26–29 maya 2014 g.* [Monitoring the state of the Antarctic natural environment and supporting national expedition activities. Proceedings of the 1st International scientific and practical conference, Naroch, Belarus, May 26–29, 2014]. Minsk, Ekoperspektiva Publ., 2014, pp. 41–46. (in Russian)

Информация об авторах

Грибик Ярослав Гаврилович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией геотектоники и геофизики Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yaroslavgribik@tut.by

Шаблыко Павел Викентьевич – научный сотрудник Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: ecktobellum@gmail.com

Козловский Николай Витальевич – младший научный сотрудник Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: nkozlovsky2203@gmail.com

Шеметило Михаил Александрович – младший научный сотрудник Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: michaelstunone@gmail.com

Information about the authors

Yaroslav G. Gribik – PhD in Geology and Mineralogy, Associate Professor, and Head of the Laboratory of Geotectonics and Geophysics at the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yaroslavgribik@tut.by

Pavel V. Shablyko – Researcher at the Institute of Environmental Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: ecktobellum@gmail.com

Nikolai V Kozlovsky – Junior researcher at the Institute of Environmental Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 10, 220076, Minsk, Belarus). E-mail: nkozlovsky2203@gmail.com

Mikhail A. Shemetilo – Junior researcher at the Institute of Environmental Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 10, 220076, Minsk, Belarus). E-mail: michaelstunone@gmail.com

УДК 551.733.3(476)

Поступила в редакцию 28.10.2025

Received 28.10.2025

СИЛУРИЙСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

Д. П. Плакс

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье предлагается усовершенствованная Стратиграфическая схема силурийских отложений Беларуси. В общей стратиграфической шкале приведено расчленение системы на две подсистемы: нижнюю и верхнюю. Отделов не два, как ранее было принято в Стратиграфической схеме силурийских отложений Беларуси (2010 г.), а четыре, согласно Международной хроностратиграфической (2024 г.) и Общей стратиграфической шкалам (2024 г.): лландоверийский, венлокский, лудловский и пржидольский. Подъярусы, введенные в предыдущую схему 2010 г., сейчас переведены в ранг ярусов, которых всего насчитывается семь в вышеуказанных Международной хроностратиграфической и Общей стратиграфической шкалах, но только пять из них установлены на территории Беларуси. Так, верхи лландоверийского отдела, начинающие разрез силура на территории страны, отнесены к телическому ярусу; венлокский отдел подразделяется на шейнвудский и гомерский ярусы; лудловский отдел – на горстийский и лудфордский ярусы; пржидольский отдел не включает в себя никаких ярусов. Помимо вышеназванных новшеств в Стратиграфическую схему силура Беларуси вводится также обновленная последовательность стандартных граптолитовых зон и приводятся установленные Д. П. Плаксом зоны по ихтиофауне. В региональной стратиграфической схеме силура Беларуси используется самостоятельная последовательность горизонтов, базирующаяся на изучении разрезов Подляско-Брестской впадины. Территория впадины подразделяется, как это было принято ранее, на западную и восточную части, каждая из которых характеризуется определенным набором свит и пачек. Раздел корреляции местных стратиграфических подразделений Беларуси дополняется шестью новыми, введенными Д. П. Плаксом, местными стратиграфическими подразделениями – свитами. В пределах Волынской моноклинали это комаровская, кладневская, рытецкая и приборовская свиты, а в пределах Прибалтийской моноклинали – островецкая и вилейская свиты. Приводится также корреляция белорусских разрезов силура с одновозрастными образованиями польской части Подляско-Брестской впадины, Волыни (северо-запад Украины), Средней и Восточной Литвы, а также Эстонии.

Ключевые слова: Беларусь; силурийские отложения; стратиграфия.

Для цитирования. Плакс Д. П. Силурийские отложения территории Беларуси // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 131–145.

SILURIAN DEPOSITS IN THE TERRITORY OF BELARUS

D. P. Plax

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The paper proposes an improved Stratigraphic chart of the Silurian deposits of Belarus. The general stratigraphic scale shows the division of the system into two subsystems: lower and upper. There are not two series, as was previously accepted in the Stratigraphic chart of the Silurian deposits of Belarus (2010), but four, according to the International Chronostratigraphic (2024) and General stratigraphic charts (2024): Llandovery, Wenlock, Ludlow and Pridoli. The substages introduced into the previous chart of 2010 have now been transferred to the rank of stages, of which there are seven in the above-mentioned International Chronostratigraphic and General stratigraphic charts, but only five of them have been established on the territory of Belarus. So, the upper part of the Llandovery series, which begins the section of the Silurian in the territory of the country, is included to the Telichian stage; the Wenlock series is subdivided into the Sheinwoodian and Homerian stages; the Ludlow series is subdivided into the Gorstian and Ludfordian stages; the Pridoli series does not include any stages. In addition to the above-mentioned innovations, the Stratigraphic chart of the Silurian of Belarus also includes an updated sequence of standard graptolite zones and the D. P. Plax's established zones for ichthyofauna are presented. The regional stratigraphic chart of the Silurian of Belarus was used by independent sequence of the regional stages, which was based on the study of sections of the Podlasie-Brest Depression. The territory of this depression is divided, as was previously accepted, into western and eastern parts, each of which is characterized by a certain sequence of formations and members. The section of the correlation of local stratigraphic units of Belarus is supplemented by six new local stratigraphic subdivides – formations, introduced by the D. P. Plax. Within the Volyn Monocline these are the Komarovka, Kladnev, Rytets and Priborovo Formations, and within the Baltic Monocline these are the Ostrovets and Vileyka Formations. The Silurian deposits of Belarus were correlated with coeval sediments in the Polish part of the Podlasie-Brest Depression, Volyn area (northwest Ukraine), Central and Eastern Lithuania, and Estonia.

Keywords: Belarus; Silurian deposits; stratigraphy.

For citation. Plax D. P. Silurian deposits in the territory of Belarus. *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 131–145.

Введение. Силурийские отложения на территории Беларуси имеют крайне ограниченное площадное распространение. Они распространены в двух разобщенных друг от друга районах: на юго-западе страны в пределах Подляско-Брестской впадины и Волынской моноклинали, а также на северо-западе республики в пределах Прибалтийской моноклинали [1–4]. Там они представлены разнофациальными образованиями лагунного, мелководного, относительно мелководного и сравнительно глубоководного морского генезиса, мощность которых достигает 630 м на юго-западе страны и не превышает 80 м на северо-западе. Силурийские отложения Подляско-Брестской впадины и Волынской моноклинали характеризуются наибольшей стратиграфической полнотой разреза и содержат множество разнообразных органических остатков, тогда как силур в пределах белорусской части Прибалтийской моноклинали характеризуется гораздо меньшей стратиграфической полнотой разреза и не содержит большого разнообразия остатков ископаемых организмов.

Первые достоверные сведения о силурийских отложениях на территории Беларуси приведены в монографиях [5–7] и включают общие сведения о литологическом составе и строении верхних горизонтов силура Подляско-Брестской впадины, вскрытых в 1950-е годы глубоким бурением. Позднее, в период с 1960-х по начало 1970-х годов, в связи с развернувшимися масштабными буровыми работами силурийские отложения были пройдены на полную мощность. Многочисленные скважины обеспечили получение представительных образцов керна. Это, в свою очередь, позволило, опираясь на промыслово-геофизические исследования и изучение вещественного состава отложений, выделить ряд литологических пачек [8, 9]. Таким образом, в это время была сформирована литостратиграфическая основа для последующих стратиграфических построений.

В конце 1970-х – начале 1980-х годов в результате комплексных литолого-биостратиграфических исследований была разработана первая «Стратиграфическая схема силурийских отложений Белоруссии» (1981 г.), авторами которой являлись В. И. Пушкин, Г. В. Зиновенко, Т. И. Моисеева, В. Ф. Ропот и основу которой составляли материалы по территории Подляско-Брестской впадины [10, 11].

Начиная с 1981 г. и по начало 2000-х годов изучение силурийских отложений Беларуси активно продолжалось. За этот период было получено много новых палеонтолого-стратиграфических данных, которые были достаточно подробно и обстоятельно подытожены В. И. Пушкиным в работах [1, 2]. По этой причине назрела необходимость уточнения и дополнения Стратиграфической схемы силурийских отложений Беларуси 1981 г. Ее усовершенствованный вариант был предложен В. И. Пушкиным [3, 4].

Со второй половины 2000-х годов по настоящее время продолжилось активное изучение силурийских отложений Беларуси рядом исследователей, в том числе и автором данной статьи. Были пробурены и комплексно изучены разрезы новых скважин, вскрывших силурийские отложения на юго-западе страны в пределах Подляско-Брестской впадины и Волынской моноклинали, а также на северо-западе республики в пределах Прибалтийской моноклинали. Были получены новые литолого-фациальные, промыслово-геофизические, изотопно-геохимические и палеонтолого-стратиграфические данные. Благодаря им снова назрела необходимость внесения существенных дополнений и уточнений в Стратиграфическую схему силурийских отложений Беларуси 2010 г. [4]. Ниже эти уточнения и дополнения приводятся в тексте статьи и в самой стратиграфической схеме силура. Основной акцент в уточненной и дополненной Стратиграфической схеме силурийских отложений Беларуси делается на вещественный состав стратонев и наличие в них палеонтологических остатков.

Стратиграфия силурийских отложений Беларуси. Согласно Международной хроностратиграфической (2024 г.) [12] и Общей стратиграфической шкалам (2024 г.) [13] силурийская система подразделяется на четыре отдела: лландоверийский и венлокский (нижний силур), лудловский и пржидольский (верхний силур). Лландоверийский отдел включает рудданский, аэронский и теличский ярусы; венлокский – шейнвудский и гомерский ярусы; лудловский – горстийский и лудфордский ярусы; пржидольский отдел на ярусы не подразделяется.

На территории Беларуси, как уже было сказано выше, наибольшей стратиграфической полнотой разреза силурийские отложения характеризуются в пределах Подляско-Брестской впадины и Волынской моноклинали, где они начинаются образованиями теличского яруса лландоверийского отдела, а завершаются отложениями пржидольского отдела. В пределах белорусской части Прибалтийской моноклинали силурийские отложения характеризуются гораздо меньшей стратиграфической полнотой разреза. Здесь они также начинаются образованиями теличского яруса лландоверийского отдела, но заканчиваются отложениями горстийского яруса лудловского отдела.

В описываемой ниже схеме (в отличие от схемы 2010 г.) приводится обновленная последовательность стандартных граптолитовых зон [14, 15] и вводятся установленные Д. П. Плаксом зоны по ихтиофауне [16, 17].

Последовательность региональных стратиграфических подразделений, представленная в описываемой ниже схеме, полностью идентична таковой в схеме 2010 г. Последовательность местных стратиграфических подразделений в описываемой ниже схеме в пределах Волынской моноклинали дополняется четырьмя свитами (снизу вверх) – комаровской, кладневской, рытецкой и приборовской, а в пределах Прибалтийской моноклинали наращивается двумя свитами – островецкой и вилейской.

На территории Беларуси в силуре, как это было принято и ранее [1–4], выделяются два структурно-фациальных района – юго-западный и северо-западный (рис. 1).



Рис. 1. Распространение и структурно-фациальное районирование силурийских отложений на территории Беларуси [4]:

I – Юго-западная зона

(Ia – Подляско-Брестская впадина, Ib – Волынская моноклираль);

II – Северо-западная зона (Прибалтийская моноклираль)

Fig. 1. Distribution and structural-facies zoning of the Silurian deposits in the territory of Belarus [4]:

I – Southwestern zone

(Ia – Podlasie-Brest Depression, Ib – Volyn Monocline);

II – Northwestern zone (Baltic Monocline)

Юго-западный структурно-фациальный район включает Подляско-Брестскую впадину и Волынскую моноклираль, разделенные Луковско-Ратновским горстом. Разрез силура на территории Беларуси в пределах Подляско-Брестской впадины представлен образованиями нижнего и верхнего силура (рис. 2). Здесь установлена постепенная смена фаций от лагунных или мелководно-морских в восточной части до относительно глубоководных на крайнем западе, на границе с Польшей. Здесь в составе силура выделены следующие региональные стратиграфические подразделения в ранге горизонтов: зельвянский (теличский ярус лландоверийского отдела), липновский (шейнвудский и гомерский ярусы венлокского отдела), франопольский, русиловский, леснянский (горстийский и лудфордский ярусы лудловского отдела), мухавецкий и кушинский (пржидольский отдел) [1–4]. На территории белорусской части Волынской моноклинали в составе силура (см. рис. 2) выделены стратиграфические подразделения в ранге свит: комаровская (теличский ярус лландоверийского отдела) (данная свита выделена в этой работе), кладневская (шейнвудский и гомерский ярусы венлокского отдела), рытецкая (горстийский ярус лудловского отдела) (данная свита выделена в этой работе), приборовская (лудфордский ярус лудловского отдела) (данная свита также выделена в этой работе), гущинская и томашовская (пржидольский отдел) [3, 4, 18–20]. Ниже последовательно (снизу вверх) приводятся основные отличительные характеристики названных свит и горизонтов.

Fig. 2. Stratigraphic chart of the Silurian deposits of Belarus

Зельвянский горизонт, соответствующий одноименной **зельвянской свите**, был выделен В. И. Пушкиным с соавторами [3, 4, 10] на территории Подляско-Брестской впадины в разрезе скважины Ратайчицы 12к (гл. 926,0–948,0 м) и полностью соответствует телическому ярусу пландоверийского отдела нижнего силура, т. е. отложения рудданского и аэронского ярусов пландоверийского отдела здесь отсутствуют [1–4]. Таким образом, отложения зельвянского горизонта со стратиграфическим несогласием залегают на породах среднего ордовика. Они представлены толщей зеленовато-серых и темно-серых глин и мергелей с редкими прослоями глинистых известняков. Породы очень богаты органическими остатками, представленными акритархами *Baltisphaeridium wenlockense* Down., *B. paucispinosum* Down., *Veryhachium lairdi* (Defl.), *Leiosphaeridia tenuissima* Eisen., *Domasia elongata* Down., *D. amphora* Martin, створками остракод *Longiscella caudalis* (Jones), *Silenis mawii mawii* (Jones), *S. longus* Abush., *Neckajatia modesta* (Neck.), *Bardiocypris phillipsanus* (Jones et Holl), раковинами брахиопод *Eoplectodonta penkillensis* (Reed), *Leptaena belorussica* Modz. et Pushk., *Platystrophia brachinota* (Hall), *Skenidioides acutum* (Lind.), *Resserella tatianae* Pushk., *Dicoelosia alticavata* (Whitt. et Bar.), скелетами мшанок *Mesotrypa estonica* Astr., *Hallopora elegantula* (Hall), *H. clausa* Bassl., *Eredotrypa variabilis* Pushk., *Ptilodictya procera* Pushk. и веточками граптолитов *Oktavites spiralis* (Gein.), *Monograptus priodon* (Bronn.), *M. parapriodon* Bouč., *Monoclimacis sublinnarsoni* Prib., *M. griestoniensis minuta* (Nicol.) [4, 21, 22]. Очень редко в породах этого горизонта встречаются чешуи телодонтов *Loganellia* sp. и *L. scotica* (Traq.). Мощность этих отложений достигает до 22,0 м. Зельвянский горизонт соответствует по граптолитам последовательности зон (снизу вверх): *Oktavites spiralis*, *Cyrtograptus lapworthi*, *Cyrtograptus insectus* и *Cyrtograptus centrifugus* [15, 23], т. е. относится к верхней половине телического яруса. Он также понимается приблизительно в объеме конодонтовых зон *Pterospathodus amorphognathoides angulatus* (самая верхняя часть), *Pterospathodus amorphognathoides lennarti*, *Pterospathodus amorphognathoides lithuanicus* и *Pterospathodus amorphognathoides amorphognathoides* [24]. По телодонтам зельвянский горизонт может соответствовать зоне *Loganellia scotica* [16].

В пределах белорусской части Волынской моноклинали отложения телического яруса пландоверийского отдела нижнего силура установлены в скважине Комаровка 913/10 [20]. Здесь они представлены толщей переслаивающихся мергелей и глин **комаровской свиты** (гл. 860,5–885,0 м, мощность 24,5 м). Эти отложения могут соответствовать зельвянской свите Подляско-Брестской впадины по положению пород в разрезе и каротажу [1–4].

Липновский горизонт, соответствующий одноименной **липновской свите**, был выделен В. И. Пушкиным с соавторами [3, 4, 10] на территории Подляско-Брестской впадины в разрезе скважины Ратайчицы 12к (гл. 851,0–926,0 м) и в полном объеме соответствует шейнвудскому и гомерскому ярусам венлокского отдела нижнего силура [1–4]. Горизонт сложен толщей зеленовато- и темно-серых мергелей с прослоями и линзами серых и светло-серых глинистых известняков, а также темно-бурых аргиллитов с остатками граптолитов *Monograptus* sp., *Colonograptus ludensis* (Murch.), *Gothograptus nassa* (Holm), *Pristiograptus jaegeri* Holl., Rick. et Warr., *P. virbalensis* Pashk., *P. ludlowensis* (Bouč.) [4]. В его составе выделено пять литологических пачек с собственными названиями (снизу вверх): **шерешевская**, **щербинская**, **хведьковичская**, **стриговская** и **смольникская**, отличающиеся различной степенью карбонатности слагающих их пород и содержащихся в них органических остатков [1–4]. Мощность отложений горизонта достигает более 90,0 м. На западе Подляско-Брестской впадины (в скважинах Высокое 1, Дубовое 31, Ратайчицы 12к и др.) в составе горизонта установлено наличие только двух граптолитовых зон – *Colonograptus ludensis* и *Gothograptus nassa* [4], входящих в биоэональный стандарт [15]. По конодонтам эти отложения соответствуют зонам (снизу вверх): *Kockelella ranuliformis*, *Kockelella amsdeni* и *Ozarkodina sagitta* [25].

На территории белорусской части Волынской моноклинали в разрезе скважины Комаровка 913/10 (гл. 650,0–860,5 м) были выделены отложения **кладневской свиты** венлокского отдела нижнего силура [20], которые представлены переслаивающимися глинистыми, доломитовыми и известковыми мергелями, доломитистыми алевролитами и аргиллитами. Мощность этих отложений достигает 200,5 м. Органические остатки в них представлены редкими обломками трилобитов и раковинами цефалопод *Orthoceratida* indet., единичными члениками криноидей, фрагментами граптолитов *Monoclimacis* sp., *Pristiograptus* sp., *Cyrtograptus* sp. и акритархами *Leiosphaeridia* sp., *L. atratus* (Naum.) Pisk., *L. cerina* Tim., *L. microrugosa* (Naum.) N. Umn., *L. plicata* (Naum.) Pisk., *Leiosphosphosphaera* aff. *aperta* Schep., *L. minutissima* (Naum.) N., Umn., *Zonosphaeridium acerbum* Andr. [20]. Отложения кладневской свиты могут являться аналогами липновской свиты Подляско-Брестской впадины по данным акритарх, вещественному составу, каротажу и положению в разрезе [1–4].

Франопольский горизонт, стратотипом которого на территории Подляско-Брестской впадины является одноименная **франопольская свита**, был выделен в 1981 г. В. И. Пушкиным с соавторами [3, 4, 10]. Он соответствует горстийскому ярусу и нижней части лудфордского яруса лудловского отдела верхнего силура [1–4, 10]. Разрез горизонта представлен толщей переслаивающихся мергелей с прослоями и линзами известняков и остатками граптолитов *Neodiversograptus nilssoni* (Barr.), *Lobograptus progenitor* Urb., *L. scanicus parascanicus* (Kühne), *Pristiograptus ludlowensis* (Bouč.), *P. vicinus* (Pern.), *P. fragmentalis* Bouč., *Monoclimacis tauragensis* (Pashk.), *Bohemograptus bohemicus*

bohemicus (Barr.), *B. bohemicus tenuis* (Bouč.), *Saetograptus chimaera* (Barr.) на западе (франопольская свита, стратотип – в разрезе скважины Ратайчицы 12к (гл. 709,0–851,0 м), в составе двух литологических пачек: **гузницкой** и **тришинской**), замещающей в восточном направлении толщей известняков со скелетами кораллов *Favosites gothlandicus* Lam., *Calamopora alveolaris* (Goldf.), *Cystihalysites mirabilis* Tchern., *Barrandeolites bowerbanki* (Milne-Edw. et Haime) и др. и остатками строматопроидей *Parallelostroma tuberculata* (Riab.), *P. dnestriensis* (Riab.), *Stromatopora lammellosa* Yav., *Clathrodictyon convictum* Yav. *C. microstriatellum* Birk. (**турнаская свита**, стратотип – в скважине Турна 5 (гл. 514,0–624,0 м), также в составе двух литологических пачек: **боярской** и **озятской**) [1–4]. Общая мощность отложений достигает 130,0 м. Кроме указанных представителей фауны в породах франопольского горизонта также установлены остракоды *Parabolbina ventica* (Gail.), *Venzavella pilvensis* Abush. et Mois., *Mitrobeyrichia lembodes* Mart., *Hammaria pulchrivellata* Mart., *Beyrichia etelina* Mart., *Bitania binodosa* Abush. et Mois., *B. carinata* Abush. et Mois., *Silenis sulcatus* Abush. et Mois. и др., брахиоподы *Leptaena depressa* (Sow.), *Resserella canalis* (Sow.), *Dicoelosia biloba* (Linn.), *Atrypa lonsdalei* Alex., *Atrypa murchisoni* Alex., *Glossia abovata* (Sow.), *Cyrtia exporrecta* (Wahl.), *Nucleospira pisum* (Sow.) и др., мшанки *Astroviella pulwenensis* Pushk., *Fistulipora orbiculata* Astr., *F. brestensis* Pushk., *F. incerta* Astr., *F. aculeata* Astr., *F. hennigi* Pushk., *Hennigopora flexuosa* Astr., *H. ramosa* Astrova, *Ceramopora imbricata* Hall, *Favositella mirabilis* (Astr.), *Mediapore antiqua* Pushk. [1, 2, 3, 4, 22]. В западной части Подляско-Брестской впадины горизонту соответствует граптолитовая очередность зон (снизу вверх): *Neodiversograptus nilssoni*, *Lobograptus progenitor*, *Lobograptus scanicus*, *Monoclimacis tauragensis* [23], а согласно биозональному стандарту горизонт отвечает зонам *Neodiversograptus nilssoni*, *Lobograptus scanicus* и *Saetograptus leintwardinensis* [15]. По конодонтам эти отложения отвечают зонам *Ozarkodina bohémica*, *Ozarkodina tillmani*, *Kockelella variabilis* [25].

Русиловский горизонт, соответствующий одноименной **русиловской свите**, был выделен В. И. Пушкиным с соавторами [3, 4, 10] на территории Подляско-Брестской впадины в разрезе скважины Ратайчицы 12к (гл. 631,0–709,0 м) и соответствует приблизительно средней части лудфордского яруса лудловского отдела верхнего силура [1–4]. В восточных районах Подляско-Брестской впадины он сложен в основном однородной толщей комковатых известняков с многочисленными остатками кораллов и строматопроидей. Здесь в составе одноименной свиты выделяются две литологические пачки (снизу вверх): **дымницкая** и **ракитницкая**, границы между которыми хорошо фиксируются на каротажных диаграммах. На западе Подляско-Брестской впадины, вблизи с границей Польши, горизонт сложен монотонной толщей мергелей и глин с прослоями глинистых известняков. Общая мощность отложений достигает 110,0 м. В целом данные отложения богаты разнообразной фауной беспозвоночных, акритархами, несколько реже встречаются конодонты, бесчелюстные и рыбы. Среди беспозвоночных установлены строматопроидеи *Parallelostroma dnestriensis* (Riab.), *Clathrodictyon zlichovskyense* Riab., табуляты *Favosites gothlandicus* Lam., *Squameofavosites incredibilis* Chekh., *Calamopora alveolaris* (Goldf.), *Cystihalysites mirabilis* Tchern., *Mesofavosites alveolitoides konovskiensis* Tesak., *Barrandeolites bowerbanki* (Milne-Edw. et Haime), *Tuvaellites hemisphaericus* Tchern., брахиоподы *Amphistrophia funiculata* (McCoy), *Dolerorthis speciosus* Modz. et Pushk., *Isorthis clivosa* Walms., *Stegerhynchus diodontus* (Dalm.), *Sphaerirhynchia wilsoni* (Sow.), *Xenopugnax modicus* (Barr.), *Lissatrypa obovata* (Sow.), *L. rotunda* (Rybn.), *Eomartiniopsis ludlovensis* Rybn., *Nucleospira pisum* (Sow.), *Dayia minor* Bouč., мшанки *Lioclema varium* Astr., *Hennigopora flexuosa* Astr., *Fistulipora brestensis* Pushk., *F. incerta* Astr., *F. aculeata* Astr., *F. hennigi* Pushk. и др., граптолиты *Monograptus balticus* Tell. (сейчас после ревизии это *Slovinograptus balticus* (Teller)), *Fterograptus torsivus* Tseg., *Pristiograptus fecundus* Prib., *Bohemograptus praecornutus* (Bouč.), *B. cornutus* (Bouč.), *B. cincinnatus* (Bouč.), *Neocucullograptus kozlowskii* Urb., *N. auriculatus* Urb. и др. [4]. Конодонты представлены *Panderodus unicostatus* (Brans. et Mehl), *P. simplex* (Brans. et Mehl), *Pseudooneotodus beckmanni* (Bisch. et Sann.), *Paltodus multicostatus* Brans. et Mehl, *Ozarkodina* sp., *O. exavata* exavata (Brans. et Mehl), *Oulodus* sp., а ихтиофауна – *Thelodus parvidens* Agassiz и *Andreolepis hedei* Gross [16, 26]. Акритархи представлены *Leiosphaeridia cerina* Tim., *L. voighti* Eis., *L. eisenacki* (Tim.), *Zonosphaeridium indivisum* Andr. и др. [4]. Русиловский горизонт в полном объеме относится к граптолитовой зоне *Monograptus balticus* [23] (сейчас это вид *Slovinograptus balticus* (Teller)), а согласно биозональному стандарту – к зонам *Bohemograptus*, *Neocucullograptus kozlowskii* и *Polonograptus podoliensis* [15]. По конодонтам рассматриваемые отложения примерно соответствуют зонам *Kockelella variabilis* и *Polygnathoides siluricus* [25], а по ихтиофауне отвечают зоне *Andreolepis hedei* [16, 26].

Леснянский горизонт как региональное стратиграфическое подразделение первоначально был выделен Т. И. Моисеевой [27] на территории Подляско-Брестской впадины в ранге леснянских слоев, которые позже В. И. Пушкиным с соавторами [3, 4, 10] были переведены в ранг горизонта (свиты), отвечающий верхней части лудфордского яруса лудловского отдела верхнего силура [1–4]. Стратотипом этого горизонта является разрез скважины Ратайчицы 12к (гл. 579,0–631,0 м). В западной части Подляско-Брестской впадины одноименная свита представлена толщей серых, светло-серых мергелей с прослоями и комками известняков. В восточных районах рассматриваемой территории разрез сложен толщей массивных или комковатых известняков с многочисленной и разнообразной фауной, представленной строматопороидеями *Parallelostroma pseudokaugatumica* (Raib.),

кораллами *Favosites gothlandicus* Lam., *Tuvaellites hemisphaericus* Tchern., *Mesofavosites pinnatoides* Tesak., *Stereoxyloides pseudodiantus* (Weiss), *Spongophylloides perfectus* (Widekind), остракодами *Primitopsis ezerensis* Gail., *Scaldianella simplex* (Krause), *S. personata* (Krause), *Herrmannina isakovtsyensis* Abush., брахиоподами *Isorthis clivosa* Walms., *Shaleriella delicata* Harp. et Bouc., мшанками *Fistulipora incerta* Astr., *F. incompta* Astr., криноидеями и др., где он выделяется как самостоятельная **дешевическая свита** [1]. Помимо указанных групп ископаемых организмов в отложениях леснянского горизонта обнаружены конодонты *Panderodus* sp., *P. unicastatus* (Brans. et Mehl), *Ozarkodina* sp., чешуи телодонтов *Thelodus* sp., *T. sculptilis* Gross, *T. admirabilis* Märss и чешуи акантод *Gomphonchus* sp., *G. sandelensis* (Pander) и др. [16, 17, 26]. Мощность отложений горизонта колеблется от 22,0 до 82,0 м. Данный горизонт соответствует граптолитовой зоне *Formosograptus formosus* [10, 15]. В конодонтовой последовательности горизонт примерно отвечает зонам *Rotundacodina dubia* и *Ozarkodina crispa* [25], а по ихтиофауне – зоне *Thelodus sculptilis* и нижней части зоны *Thelodus admirabilis* [16].

В пределах Волынской моноклинали в разрезе скважины Комаровка 913/10 [20] Д. П. Плаксом выделяются отложения **рытецкой свиты**, отвечающие горстийскому ярусу (гл. 580,5–650,0 м, мощность 130,5 м) и образования **приборовской свиты**, соответствующие лудфордскому ярусу (гл. 474,0–580,5 м, мощность 106,5 м) лудловского отдела верхнего силура. Отложения рытецкой свиты в разрезе этой скважины представлены алевролитами с прослоями глинистых мергелей. В них установлены акритархи и многочисленные фрагменты граптолитов. Присутствие в их комплексе вида *Pristiograptus ludlowensis* (Bouč.) может указывать на горстийский возраст вмещающих отложений [28], на который также указывает наличие соответствующего комплекса акритарх. Рытецкая свита может сопоставляться по граптолитам приблизительно с нижней частью забродской свиты юго-запада Подолии [19, 29]. Отложения приборовской свиты в разрезе вышеназванной скважины сложены глинистыми мергелями с прослоями алевролитов. Из органических остатков в этих отложениях обнаружены только граптолиты, из которых виды *Formosograptus formosus* (Bouč.) и *Slovino-graptus balticus* (Tell.) являются зональными для верхней части лудфордского яруса [15, 28]. Данная свита может соответствовать большей части нерисской свиты Литвы [19, 30].

Мухавецкий горизонт как региональное стратиграфическое подразделение впервые был выделен Т. И. Моисеевой [27] на территории Подляско-Брестской впадины в ранге мухавецких слоев, которые позже были возведены с увеличением их объема в разрезе скважины Ратайчицы 12к (гл. 465,0–579,0 м) в ранг свиты и горизонта [3, 4, 10]. Эти отложения отвечают нижней половине пржидольского отдела верхнего силура [1, 2, 3, 4]. Отложения горизонта в полном объеме соответствуют последовательности граптолитовых зон (снизу вверх): *Neocolonograptus ultimus*, *Neocolonograptus parultimus*, *Neocolonograptus lochkovenski* и *Neocolonograptus branikensis* [4, 15]. Указанные граптолитовые зоны примерно параллелизуются с нижней частью конодонтовой подзоны *Ozarkodina steinhornensis eosteinhornensis* [25]. По ихтиофауне отложения мухавецкого горизонта отвечают приблизительно верхней части телодонтовой зоны *Thelodus admirabilis* и акантодовой зоне *Nostolepis gracilis* [17, 31]. Горизонт хорошо подразделяется на две свиты [32]. Нижняя часть горизонта, выделена в качестве кантиновской свиты, а верхняя – в качестве свитической свиты.

Кантиновская свита выделена по стратотипическому разрезу скважины Ратайчицы 12к (гл. 517,0–579,0 м). Она представлена толщей мягких зеленовато-серых мергелей и глин с многочисленными хаотично распространенными комками и желваками (1–5 см) серых известняков. Свита содержит множество разнообразных органических остатков, представленных кораллами *Barrandeolites bowerbanki* (Milne-Edw. et Haime), *Tuvaellites hemisphaericus* Tchern., *Paraheliolites scaliensis* Bond., *Rhamulophyllum explicatum* Sytova, *Mesosolenia reliqua* (Sok.), *Cystihalysites mirabilis* Tchern., *Lophiostroma dnestriensis* Bolsh., *Holacanthia socialis* (Soshk.), остракодами *Borussulus reticulifer* Mart., *Thlipsuritia umbonata* Abush. et Mois., *Neobeyrichia buchiana* (Jones), *N. saldusensis* Gail., *Amygdalella solida* (Gail.), *Thlipsura cognata* Abush. et Mois., *Cytherellina magna* (Neck.), брахиоподами *Lepidoleptaena poulsoni* (Kelly), *Isorthis canaliculata* (Lind.), *Homeospira* cf. *baylei* (Dav.), мшанками *Astroviella insolens* Pushk., *Hemieridotrypella beloruksiensis* Pushk., *Podljassipora oaklei* Pushk., *Fistulipora arctica* Astr., *F. crustuliformis* Astr., *F. perexiguiformis* Astr., *F. perexigua* Astr., *F. incomparabilis* Pushk., граптолитами *Neocolonograptus ultimus* (Pern.), *Istrograptus rarus* (Tell.), *I. vetus* (Tseg.) [1, 22], ихтиофауной и др. Объем этой свиты соответствует граптолитовой зоне *Neocolonograptus ultimus* [4, 23] и приблизительно верхней части телодонтовой зоны *Thelodus admirabilis* [16, 17].

Свитическая свита также была выделена по стратотипическому разрезу скважины Ратайчицы 12к (гл. 465,0–517,0 м). Она сложена в основном однородной толщей зеленовато-серых мергелей и глин без комков и прослоев известняков. Иногда только немногочисленные прослои (1–5 см) и линзы известняков наблюдаются в низах этой свиты. Органические остатки немногочисленны и менее разнообразны, чем в подстилающих отложениях. Они в основном представлены акритархами *Trachisphaeridium compactum* Piskun, *Veryhachium europeum* Deflandre, *Leiosphaeridia atratus* (Naumova), *L. plicata* (Naumova), *Tasmanites kaljoi* Timofeev, брахиоподами *Atrypa dzwinogradensis* Kozl., *Dayia bohemia* Bouč., *D. minor* Bouč., *Mesodouvillina costatula* (Barr.), *Morinorhynchus wienjukowi* (Kozl.), *Isorthis canaliculata* (Lind.), *I. ovalis* (Pashk.), *Dalejina brestica* Modz., Must. et Pushk., остракодами

Kuressaaria circulata (Neck.), *K. angulata* (Neck.), *Thlipsura cognata* Abush. et Mois., *Cytherellina magna* (Neck.) и мшанками *Astroviella insolens* Pushk., *A. silurica* Pushk., *Lioclema exile* (Pushk.), *Fistulipora arctica* Astr., *F. crustuliformis* Astr., *F. incompta* Astr., *Hennigopora flexuosa* Astr. [1, 22]. В этих отложениях еще обнаружены сколекодонты и иглокожие, которые пока не изучены, а также Д. П. Плаксом выявлены многочисленные остатки ихтиофауны, по которым установлено, что образования свитичской свиты соответствуют акантодовой зоне *Nostolepis gracilis* [16, 17].

Отложения мухавецкого горизонта можно сопоставить с образованиями минияского горизонта (свиты) и нижней частью юрского горизонта (свиты) Литвы [4, 30], а также с отложениями каугатумаского горизонта Эстонии [24]. Общая мощность отложений рассматриваемого горизонта достигает более 115,0 м.

Кустинский горизонт впервые был выделен Т. И. Моисеевой [27] на территории Подляско-Брестской впадины в разрезе скважины Ратайчицы 12к (гл. 402,0–465,0 м) как кустинские слои, которые позже В. И. Пушкиным с соавторами [3, 4, 10] были переведены в ранг свиты и горизонта. Эти отложения соответствуют верхней части пржидольского отдела и завершают разрез силура на территории Подляско-Брестской впадины. Они представлены, кроме самых низов, лагунными фациями [1–4]. Мощность отложений этого горизонта достигает около 65,0 м. Это очень однообразная толща зеленовато- и голубовато-серых (часто блеклых) рыхлых мергелей и глин с маломощными прослойками известняков. Органические остатки представлены акритархами *Veryhachium europaeum* Defl., *V. geometricum* (Deunff), *Trachisphaeridium compactum* Pisk., *T. textriplicatum* Pisk., *Leiosphaeridia otrada* (Naum.), трилобитами *Calymene tentaculata* (Schlotheim), остракодами *Hemsiella dalmaniana* (Jones), *Bollia parva* Gail., *Aechmina molengraaffi* Botke, *Dizygopleura minuta* Mois., *Hebellum affosulatus* Mois., брахиоподами *Dayia bohemia* Bouč., *D. minor* Bouč., *Protochonetes dniestrensis* (Kozl.), *Isorthis canaliculata* (Lind.), конодонтами *Spathognathodus eosteinhornensis* Wall., *Ligonodina elegans* Wall., *Ozarkodina ortuformis* Wall. [4]. В этих отложениях также обнаружены сколекодонты и гастроподы, которые пока не изучены. С 2021 г. по настоящее время Д. П. Плаксом были установлены бесчелюстные и рыбы [16, 17, 31], которые позволили отнести отложения кустинского горизонта к ихтиозоне *Trimerolepis timanica* – *Poracanthodes punctatus*, выделенной ранее на территории стран Балтии для охесаареских отложений [24]. Образования кустинского горизонта можно скоррелировать с отложениями верхней части юрской свиты Литвы [4, 28, 30].

В пределах белорусской части Волынской моноклинали пржидольские отложения вскрыты тремя скважинами: Томашовка 4116, Томашовка 11 и Комаровка 913/10. В составе этих отложений выделяются две свиты: нижняя – гуцинская и верхняя – томашовская. **Гуцинская свита** впервые была выделена П. Д. Цегельнюком в скважине Гуца 4015 (гл. 564,0–626,0 м) на территории Украины, где она представлена толщей темноцветных мергелей и аргиллитов с прослоями глинистых известняков с редкими органическими остатками, представленными остракодами, граптолитами и др. [3, 4, 33]. На территории Беларуси отложения гуцинской свиты были также установлены в скважине Комаровка 913/10 (гл. 361,0–474,0 м, мощность 113,0 м) [20]. Здесь эти отложения представлены толщей глинистых доломитовых и известковых мергелей светлого серого цвета, переслаивающихся с доломитистыми аргиллитами и алевролитами. Органические остатки представлены сколекодонтами, цефалоподами *Orthoceratida* indet., мелкими фрагментами граптолитов, ихтиофауной *Thelodus* sp., *T. parvidens* Agassiz, *Loganellia cuneata* Gross, *Nostolepis gracilis* Gross [16, 17], акритархами *Peterinosphaeridium* sp., *Zonosphaeridium absolutum* Tim., *Dictyotidium* sp., *Alveosphaera locellata* Kir., *Tasmanites cavernosum* (Andr.) Pisk., *T. fimbriatum* (Andr.) Pisk., *T. kaljoi* Tim., *T. medium* (Eis.) Pisk., *Veryhachium rhomboidium* Down., *V. europaeum* Stock. et Well., *V. valiente* Cram., *Leiofusa* aff. *cantabrica* Cram., *Leiosphaeridia cerina* Tim., *L. eisenackia* (Tim.) Tim., *Multiplicisphaeridium pilaris* Cram. var. *typicum* (Cram.) Kir., *Leiofusa rhikne* Loeb. и миоспорами *Tholisporites chulus* (Cram.) McGreg. var. *nanus* Rich. et Lister, *T. chulus* (Cram.) McGreg. var. *chulus* Cram., *Retusotrites simplex* Naum., *R. maculatus* McGreg. et Camf., *Anaplanisporites* sp., *Ambitisporites avitus* Hoff., *Scabratisporites minor* (Naum.) McGreg., *Punctatisporites dilutus* Hoff. [20]. Акритархи и ихтиофауна позволяют обосновывать возраст этих отложений.

Томашовская свита была установлена П. Д. Цегельнюком на территории Беларуси и имеет стратотип в скважине Томашовка 4116 (гл. 536,0–648,0 м) [3, 4, 33], где она сложена серыми, светло-серыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами, мергелями и известняками. Из органических остатков в ней установлены остракоды, брахиоподы, граптолиты и др. В скважине Томашовка 11 (гл. 487,2–521,3 м, мощность 34,1 м) данная свита представлена толщей переслаивающихся темно-серых аргиллитоподобных мергелей и аргиллитов с прослоями небольшой мощности (0,5–3,0 см) серых известняков, содержащих панцири трилобитов, створки остракод *Amygdalella subclusa* Mart., *Polenovula solida* Gail., *Kuressaaria circulata* (Neck.), *Microcheilinella* sp., *Venzavella* sp., *Cytherellina* aff. *magna* (Neck.), *Pseudoravella scala* Neck., раковины тентакулитов, раковины брахиопод *Dayia bohemia* Bouč., *D. minor* Bouč., *Protochonetes dniestrensis* (Kozl.), *Shaleriella tenuis* Nikif., *Isorthis ovalis* (Pashk.), скелеты мшанок *Astroviella silurica* Pushk., *Anisotrypa callosa* Pushk., *A. proavus* Astr., *Fistulacanta numerosa* Pushk., *Fistulipora menneri* Pushk., *Callocladia cava* Pushk., остатки конодонтов *Ligonodina elegans* Wall., *Ozarkodina typica* Brans. et Mehl, *Neoprioniodus bicurvatus* (Brans. et Mehl), *Spathognathodus primus* (Brans. et Mehl), *S. eosteinhornensis* Wall., *Trichonodella inconstans* Wall. и др. [1–4, 34].

В скважине Комаровка 913/10 (гл. 339,8–361,0 м, мощность 21,2 м) томашовская свита сложена толщей слюдистых глинистых мергелей, переходящих в алевролиты. Органические остатки представлены трубочками червей *Spirorbis* sp., сколекодонтами, остракодами, брахиоподами *Dayia minor* Bouč., цефалоподами отряда *Orthoceratida*, тентакулитами, обломками стеблей криноидей, мелкими фрагментами граптолитов, остатками ихтиофауны *Nostolepis* sp., *N. striata* Pander, *Nostovicina paravolborthi* Valiuk., *Cheiracanthoides* sp., *C. planus* Valiuk., *Gomphonchus* sp., *G. cf. volborthi* (Rohon), *G. sandelensis* Pander., *G. cf. sandelensis* Pander, *Gomphonchoporus hoppei* (Gross), *Poracanthodes* sp., *P. punctatus* Brotzen, *Acanthodii* gen. et sp. indet., *Tylodus deltoides* Rohon и др. [16, 17], акритархами *Tasmanites kaljoi* Tim., *T. fimbriatum* (Andr.) Pisk., *T. medium* (Eis.) Pisk., *T. cavernosum* (Andr.) Pisk., *Zonosphaeridium absolutum* Tim., *Z. actinomorphum* Tim., *Veryhachium* sp., *V. europaeum* Stock. et Will., *V. rhomboidium* Down., *V. downiei* Stock. et Will., *Leiosphaeridia* sp., *L. cerina* Tim., *L. eisenackia* (Tim.) Tim., *L. tenuissima* (Eis.), *Baltisphaeridium brevispinosum* Pisk. var. *granuliferum* Down., *Multiplicisphaeridium carallinum* (Eis.) Kir., *M. pilaris* Cram. var. *typicum* (Cram.) Kir., *Diexallophasis denticulata* (Stock. et Will.) Loeb., *D. denticulata* Kir. var. *wolynica* Kir., *G. carnarvonense* Pl., *Leiofusa* sp., *L. cantabrica* Cram., *L. aff. cantabrica* Cram., *L. rugosa* N. Umn. и миоспорами *Synorisporites papillensis* McGreg., *T. chulus* (Cram.) McGreg. var. *nanus* Rich. et Lister, *T. chulus* (Cram.) McGreg. var. *chulus* Cram., *Retusotriletes simplex* Naum., *R. concinnus* Kedo, *R. warringtonii* Rich. et Lister, *R. maculatus* McGreg. et Camf., *Shophites* sp., *Deltoidospora priddyi* (Berry) McGreg., *Amicosporites splendidus* Cram., *Punctatisporites dilutus* Hoff. [20].

Отложения томашовской свиты на рассматриваемой территории либо согласно перекрываются образованиями домашёвской свиты борщовского горизонта лохковского яруса нижнего девона [35], либо с большим перерывом в осадконакоплении перекрываются отложениями дреговичской свиты михайловского горизонта визейского яруса нижнего карбона [20].

Северо-западный структурно-фациальный район включает территорию Прибалтийской моноклинали. Разрез силура здесь представлен лландоверийским и венлокским отделами нижнего силура и горстийским ярусом лудфордского отдела верхнего силура [3, 4, 36–38]. На основе литологических, геофизических и палеонтологических данных в пределах этого структурно-фациального района в разрезе силура выделены образования швянчёнской, ячёнской, островецкой и вилейской свит, представленные краевыми фациями (см. рис. 2). Ниже последовательно (снизу вверх) приводятся основные отличительные характеристики перечисленных свит.

Швянчёнская свита представлена толщей зеленовато-серых, блеклых, доломитовых мергелей и глин с прослоями и линзами доломитизированных светло-серых известняков и доломитов, относящихся к теличскому ярусу лландоверийского отдела нижнего силура [1–4]. Типовой разрез этой свиты на территории Беларуси выделен в разрезе скважины Ольгиняны 086 (гл. 126,0–148,5 м). Максимальная мощность 30,0 м данной свиты вскрыта в скважине Островец 1 (гл. 166,0–196,0 м). Органические остатки в отложениях этой свиты довольно разнообразны. В отложениях швянчёнской свиты установлены акритархи *Diexallophasis denticulata* Kir. var. *podolica* Kir., *D. denticulata* Kir. var. *tetraedrica* Kir., *Domasia* sp., *D. angusta* Down., *D. elongata* Down., *D. amphora* Martin, *D. ovalie* N. Umn., *Leiofusa* sp., *Lophosphaeridium* sp., *L. baculatum* N. Umn., *L. pilosum* Down., *L. isotuberulatum* N. Umn., *L. deplanatum* N. Umn., *L. parvum* N. Umn., *L. crassum* (Naum.), *L. rotundum* (Naum.) Pisk., *L. citrinum* Down., *L. rarum* Tim., *Baltisphaeridium* sp., *B. longispinosum* Eis. var. *parvum* (Eis.) Down., *B. microspinosum* (Eis.) Down., *B. arrectum* (Tim.) N. Umn., *B. oligofurcatum* (Eis.) Down. et Sar., *B. minor* (Naum.) N. Umn., *B. nanum* (Deff.) Kir., *B. rugosum* (Naum.) N. Umn., *Micrhystridium* sp., *M. stellatum* Deff., *M. acerbum* Martin, *Veryhachium* sp., *V. trispinosum* (Eis.) Deunff., *V. tetrahedron* N. Umn. var. *venlockium* Down., *V. rhomboidium* Down., *V. europaeum* Stock. et Will., *Deunffia* sp., *Leiosphaeridia plicata* (Naum.) Pisk., *L. flavum* (Andr.) Pisk., *L. eisenackia* (Tim.) Tim., *L. minutissima* (Naum.) Pisk., *L. atrata* (Naum.) Pisk., *L. microrugosa* (Naum.) Pisk., *Dictyotidium* sp., *Trachysphaeridium minutissimum* (N. Umn.) N. Umn., *T. plicatum* Pisk., *T. universalum* (N. Umn.) N. Umn., *Multiplicisphaeridium irregulare* Stapl., Jans. et Pock., *M. frondis* (Cram. et Diez.) Kir., *M. ramusculosum* Kir. var. *insolitum* (Cr. et Diez) Kir., *Leiosphosphosphaera* sp., *L. accreta* N. Umn., *L. minutissima* (Naum.) N. Umn., *Leiomarginata* sp., *L. minuta* N. Umn., *L. simplex* Naum., *Ooidium unicum* N. Umn., *Multisphaeridium irregulare* Stapl., Jans. et Pock., *Zonosphaeridium* sp., *Z. rotundum* (Naum.) Pisk., *Peteinosphaeridium* sp., *P. robertinum* (Cr.) Pisk., *P. arbusculiferum* (Down.) N. Umn., *P. brevifurcatum* (Eis.) N. Umn., сколекодонты *Oenonites* sp., *Polychaetaspis* sp., брахиоподы *Dicoelosia* cf. *biloba* (Linne), *Sowerbyella* cf. *undulata* (Salter), мшанки *Hallopora* sp., конодонты *Pterospathodus* sp., *Panderodus unicostatus* (Brans. et Mehl), *Ozarkodina gulletensis* (Aldridge), а также пока еще совсем неизученные – спикеры губок, остракоды, членики криноидей и веточки граптолитов [36–38]. Мощность отложений этой свиты достигает до 30,0 м. Швянчёнская свита по литологическому облику и комплексу органических остатков сопоставляется с верхней частью адавереского горизонта теличского яруса лландоверийского отдела нижнего силура Эстонии [19, 24, 39]. Отложения этой свиты также хорошо сопоставляются по вещественному составу и палеонтологическим данным с образованиями одноименной свиты адавереского горизонта Восточной Литвы [19, 28, 30]. Швянчёнскую свиту также можно сопоставить с нижней частью свиты Визби (Lower Visby Formation) острова Готланд (Швеция) [40–42].

Ячёнская свита сложена сравнительно однородной толщей неясно комковатых светло- и голубовато-серых доломитов и доломитизированных известняков с прослоями доломитовых мергелей и в полном объеме соответствует шейнвудскому ярусу венлокского отдела нижнего силура [1–4]. На территории Беларуси в разрезе скважины Ольгиняны 086 (гл. 105,0–126,0 м) выделен типовой разрез этой свиты [4]. Из органических остатков в породах этого стратона были установлены акритархи *Domasia* sp., *D. amphora* Martin, *D. angusta* Down., *D. elongata* Down., *Veryhachium* sp., *V. trispinosum* (Eis.) Deunff., *V. europaeum* Stock. et Will., *V. visbyense* (Eis.) N. Umn., *V. cuneidentatum* (Tim.) N. Umn., *V. tetrahedron* Eis. var. *venlockium* Down., *Baltisphaeridium* sp., *B. minor* (Naum.) N. Umn., *B. nanum* (Deff.) Kir., *B. arrectum* (Tim.) N. Umn., *B. crassum* (Naum.) N. Umn., *B. oligofurcatum* (Eis.) Down. et Sar., *B. longispinosum* (Eis.) N. Umn. var. *parvum* (Eis.) Down., *B. longispinosum* (Eis.) N. Umn. var. *paucispinosum* Down., *B. scabrosum* Kir., *B. microspinosum* (Eis.) Down., *B. brevispinosum* Eis. var. *wenlockensis* Down., *Micrhystridium* sp., *M. stylosum* Kir., *M. stellatum* Deff., *M. rarifurcatum* Kir., *M. staplini* Kir., *M. acerbum* Martin, *Multiplicisphaeridium* sp., *M. frondis* (Cr. et Diez.) Kir., *M. forquillum* (Cr. et Diez.) Kir., *M. irregulare* Stapl., Jans. et Pock., *M. meson* Kir. var. *dentispinum* Kir., *M. ramusculosum* Kir. var. *insolitum* (Cr. et Diez.) Kir., *M. cladum* (Down.) Kir., *Zonosphaeridium mutilum* (Andr.), *Z. limpatum* Tim., *Z. acerbum* Andr., *Lophosphaeridium crassum* (Naum.) N. Umn., *L. pilosum* Down., *L. rotundum* (Naum.) Pisk., *L. abnormis* Pisk., *L. turulosum* N. Umn., *L. deplanatum* N. Umn., *L. baculatum* N. Umn., *L. lobatum* N. Umn., *Diexallophasis denticulata* Kir. var. *tetraedrica* Kir., *Peteinosphaeridium robertinum* (Cr.) Pisk., *P. arbusculiferum* (Down.) N. Umn., *P. granulatisphaeridium* (Down.) Pisk., *Cymatiosphaera subrotunda* Kir., *Dictyotidium arctum* Kir., *Duvernashaera aranaides* (Cr.) Kir., *Leiosphaeridia* sp., *L. minutissima* (Naum.) Pisk., *L. atrata* (Naum.) Pisk., *L. plicata* (Naum.) Pisk., *L. eisenackia* (Tim.) Tim., *L. tenuissima* Eis., *Trachysphaeridium minutissimum* (N. Umn.) N. Umn., *T. plicatum* Naum., *Leiofusa* sp., *L. minima* N. Umn., *L. filifera* Down. var. *parva* N. Umn., *Ooidium unicatum* N. Umn., *Zonosphaeridium limpatum* Tim., *Lophomarginata deplanata* N. Umn., сколекодонты *Oenonites* sp., *O. ?* sp., *O. sp. B*, *O. cf. latus* Eriks., *O. jennyensis* Eriks., *O. cf. eichwaldi* Eriks., *Marlenites* sp., *Mochtyella* sp., *Protarabellites* sp., *Atraktopirion* sp., мшанки *Helopora* sp., конодонты *Ozarkodina* sp. A, единичные чешуи телодонтов *Loganellia* sp., *L. sulcata* Märss, Wils. et Thorst. (данный вид телодонтов может выступать руководящим для нижней части ячёнских отложений), а также пока еще совсем неизученные строматопроеидеи, кораллы, брахиоподы, криноидеи и граптолиты [36–38]. Недавно в самой верхней части свиты найдены редкие чешуи *Loganellia grossi* Fredholm, которые указывают на то, что верхи ячёнской свиты соответствуют одноименной телодонтовой зоне. Мощность отложений этой свиты достигает до 80,0 м. Она коррелируется с яаниским горизонтом и нижней частью яагарахуского горизонта Эстонии [39]. По литологическому составу и комплексу органических остатков эта свита сопоставляется с ячёнской свитой (папреняйской свитой) и нижней частью яркнеской свиты Восточной Литвы [30]. Ячёнскую свиту также можно сопоставить с верхней частью свиты Визби (Upper Visby Formation) и группой Халл (Hall Group) острова Готланд [41, 42].

Островецкая свита впервые была выделена Д. П. Плаксом в разрезе скважины Островец 1 (гл. 110,0–140,0 м) [36]. Она сложена в основном голубовато-серыми, светло-серыми (местами в кровле разреза с пестроцветными пятнами и разводами), однородными, плотными, неясно-слоистыми, глинистыми мергелями с прослоями светло-серых, светло-кремовых, крепких, плотных, скрытокристаллических, неслоистых доломитизированных мергелей и светло-серых, серых, голубовато-серых, комковатых, однородных глин. Отложения этой свиты соответствуют нижней части гомерского яруса венлокского отдела нижнего силура. В породах этой свиты были найдены части челюстей сколекодонтов *Kallopriion* sp., *Oenonites ?* sp., *O. sp.*, единичные брахиоподы *Skenidioides* sp., малочисленные мшанки *Helopora* cf. *fragilis* Hall, редкие конодонты *Ozarkodina excavata* (Brans. et Mehl), многочисленные чешуи телодонтов *Loganellia* sp., *L. grossi* Fredholm, *L. einari* Märss, *Oeselia mosaica* Märss, *Thelodus* sp. и акритархи *Lophosphaeridium* sp., *L. citrinum* Down., *L. plicatula* N. Umn., *L. baculatum* N. Umn., *L. crassum* (Naum.) N. Umn., *L. rotundum* (Naum.) Pisk., *Leiosphaeridia* sp., *L. cerina* Tim., *L. eisenackia* (Tim.) Tim., *L. rarorugosa* (Naum.) Pisk., *L. microrugosa* (Naum.) Pisk., *L. plicata* (Naum.), *L. minutissima* (Naum.), *L. atrata* (Naum.) Pisk., *L. flavum* (Andr.) Pisk., *L. tenuissima* Eis., *Leiosphosphosphaera* sp., *L. minutissima* (Naum.) N. Umn., *Leiomarginata* sp., *L. minuta* N. Umn., *Thachysphaeridium* sp., *T. minutissimum* (N. Umn.) N. Umn., *T. plicatum* Pisk., *Baltisphaeridium* sp., *B. minor* (Naum.) N. Umn., *B. microspinosum* (Eis.) Down., *B. nanum* (Deff.) Kir., *B. longispinosum* (Eis.) N. Umn. var. *parvum* (Eis.) Down., *B. longispinosum* (Eis.) N. Umn. var. *paucispinosum* Down., *B. listeri* Kir., *B. crassum* (Naum.) N. Umn., *B. oligofurcatum* (Eis.) Down. et Sar., *Latoporata* sp., *L. crispata* (Tim.) N. Umn., *Multiplicisphaeridium frondis* (Cr. et Diez.) Kir., *M. ramusculosum* var. *insolitum* (Cr. et Diez.) Kir., *M. forquillum* (Cr. et Diez.) Kir., *Visbysphaera gotlandica* (Eis.) Kir., *Peteinosphaeridium ramusculosum* (Deff.) Pisk., *P. arbusculiferum* (Down.) N. Umn., *P. robertinum* (Cr.) Pisk., *Veryhachium* sp., *V. trispinosum* (Eis.) Deunff., *Micrhystridium* sp., *M. parinospicuum* Deff., *M. robustum* Down., *M. stellatum* Deff., *Cymatiosphaera heloderma* Cr. et Diez., *Dictyosphaeridium* sp., *Zonosphaeridium* sp., *Z. absolutum* Tim., *Leiosphosphosphaera minutissima* (Naum.) N. Umn., *L. accreta* N. Umn. и др. [36–38]. Островецкой свите соответствует телодонтовая зона *Loganellia einari* [16, 36]. Мощность отложений этой свиты достигает до 32,0 м. Островецкая свита хорошо коррелируется по ихтиофауне с верхней частью яагарахуского горизонта Эстонии [24, 43]

и верхней частью группы слоев Слите (пачка «g») (Slite Group, unit «g») острова Готланд [40–42, 44]. При сопоставлении островецкой свиты с разрезами сопредельных районов Восточной Литвы ее следует, скорее всего, коррелировать со средней частью яркнеской свиты яагарахуского горизонта [30, 37, 45, 46].

Вилейская свита впервые была выделена Д. П. Плаксом с соавторами [38] в разрезе скважины Давтюны 3к (гл. 98,3–129,8 м). Она представлена доломитизированными известняками, глинистыми доломитизированными известняками, доломитами, глинистыми доломитами, глинистыми известняками, известняками, мергелями, доломитовыми мергелями и глинами, относящимися к горстийскому ярусу лудловского отдела верхнего силура. Из органических остатков в породах этой свиты были установлены акритархи и конодонты *Ozarkodina* sp., *O. ?* sp., *Oulodus* sp., *O. ?* sp., *Ctenognathodus* sp., *C. ?* sp., *Conodonta* indet. Общая мощность отложений этой свиты достигает 31,5 м. Отложениями вилейской свиты заканчивается разрез силура в этом структурно-фациальном районе. Выше с большим перерывом в осадконакоплении залегают образования эйфельского яруса среднего девона либо образования кайнозоя. Вилейская свита может сопоставляться с нижней частью паадлаского горизонта горстийского яруса лудловского отдела верхнего силура Эстонии [24] и нижней частью группы Хемсе (Hemse Group, levide fm.) острова Готланд [40–42]. При сопоставлении этой свиты с разрезами сопредельных районов Восточной Литвы ее следует, скорее всего, коррелировать с нижней частью нерисской свиты дубисского горизонта горстийского яруса лудловского отдела верхнего силура [30, 47].

Заключение. В статье предложена уточненная и дополненная Стратиграфическая схема силурийских отложений Беларуси, основанная на схеме, разработанной ранее В. И. Пушкиным, и используемая в настоящее время [4]. Полученные после 2005 г. по настоящее время новые литолого-фациальные, промыслово-геофизические, изотопно-геохимические и палеонтолого-стратиграфические данные позволили внести в нее ряд уточнений и дополнений, которые изложены в данной статье. Однако стоит отметить, что не все еще изучено в достаточно полном объеме. Исходя из этого можно наметить основные задачи дальнейших исследований силурийских отложений страны. Необходимо: 1) продолжить изучение литостратиграфии силурийских отложений Беларуси; 2) выполнить монографическое изучение важных в стратиграфическом отношении групп органических остатков (трилобитов, моллюсков, брахиопод, граптолитов, конодонтов, ихтиофауны и др.); 3) продолжить изотопно-геохимические исследования силурийских отложений; 4) изучить на современном уровне различные микромерные органические остатки, довольно часто встречающиеся в силурийских отложениях Беларуси (сколекодонты, остракоды, тентакулиты и др.); 5) провести детальные послойные литолого-фациальные, биостратиграфические и палеоэкологические исследования локальных объектов, перспективных для поисков полезных ископаемых.

Список использованных источников

1. Пушкин, В. И. Силурийская система / В. И. Пушкин // Геология Беларуси / В. И. Пушкин ; под ред. А. С. Махнач [и др.]. – Минск : Ин-т геол. наук НАН Беларуси, 2001. – С. 171–186.
2. Пушкин, В. И. Силурийская система / В. И. Пушкин // Основы геологии Беларуси / В. И. Пушкин ; под общ. ред. А. С. Махнач [и др.]. – Минск : Ин-т геол. наук НАН Беларуси, 2004. – С. 102–108.
3. Пушкин, В. И. Стратиграфическая схема силурийских отложений Беларуси / В. И. Пушкин // Літасфера. – 2005. – № 1 (22). – С. 62–68.
4. Пушкин, В. И. Силурийская система / В. И. Пушкин // Стратиграфические схемы докембрийских и фанерозойских отложений Беларуси : объяснительная записка. – Минск : БелНИГРИ, 2010. – С. 93–98.
5. Махнач, А. С. Стратиграфическая схема древнепалеозойских отложений Белоруссии / А. С. Махнач // Доклады АН СССР. – 1956. – Т. 110, № 5. – С. 831–834.
6. Махнач, А. С. Древнепалеозойские отложения Белоруссии / А. С. Махнач. – Минск : Ин-т геол. наук АН БССР, 1958. – 226 с.
7. Голубцов, В. К. Фации территории Белоруссии в палеозое и раннем мезозое / В. К. Голубцов, А. С. Махнач. – Минск : Изд-во АН БССР, 1961. – 188 с.
8. Зиновенко, Г. В. Силурийские отложения Подляско-Брестской впадины / Г. В. Зиновенко, И. И. Верниковский // Вопросы геологии территории БССР и некоторых смежных районов УССР. – Минск : Наука и техника, 1970. – С. 54–63.
9. Кустинская опорная скважина Брестской впадины / А. М. Синичка [и др.]. – М. : Недра, 1970. – 143 с.
10. Стратиграфическая схема Силурийских отложений Белоруссии // Материалы по стратиграфии Белоруссии (к Межведомственному стратиграфическому совещанию) / В. И. Пушкин [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1981. – С. 41–46.
11. Решения Межведомственного регионального стратиграфического совещания по разработке унифицированных стратиграфических схем Белоруссии, 1981 г. (с унифицированными стратиграфическими корреляционными таблицами). – Л. : Изд-во ВСЕГЕИ, 1983. – 134 с.
12. The ICS International Chronostratigraphic Chart 2024/12 / K. M. Cohen [et al.] // International Commission on Stratigraphy, IUGS. – URL: www.stratigraphy.org (date of access: 03.09.2025).

13. Общая стратиграфическая шкала // Межведомственный стратиграфический комитет России (МСК). – 2024. – URL : https://karpinskyinstitute.ru/info/str_scale-03-24.pdf (дата обращения: 03.09.2025).
14. Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий // ВСЕГЕИ. – СПб., 2013. – Вып. 42. – 64 с.
15. Melchin, M. The Silurian Period / M. Melchin, P. M. Sadler, B. D. Cramer // *Geologic Time Scale 2020* / ed. by F. M. Gradstein [et al.] // Elsevier. – 2020. – Vol. 2. – P. 695–732.
16. Плас, Д. П. Стратиграфическое распространение остатков ихтиофауны в силурийских отложениях Беларуси / Д. П. Плас // Актуальные проблемы наук о Земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 27–29 сент. 2021 г. : в 2 ч. / Ин-т природопользования НАН Беларуси, Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина, Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. А. Лысенко, М. А. Богдасаров, А. А. Волчек. – Брест : БрГУ, 2021. – Ч. 1. – С. 121–124.
17. Plax, D. P. Pridolian ichthyofauna of Belarus / D. P. Plax // *Літасфера*. – 2023. – № 1 (58). – С. 26–47.
18. Tomczykowa, E. Stratigraphy of the Polish Silurian and Lower Devonian and development of the Proto-Tethys / E. Tomczykowa, H. Tomczyk // *Acta Palaeontologica Polonica*. – 1979. – Vol. 24, № 1. – P. 185–183.
19. Решения Международного стратиграфического совещания по ордовикской и силурийской системам Восточно-Европейской платформы (с региональными стратиграфическими схемами). – Л. : Изд-во ВСЕГЕИ, 1987. – 114 с.
20. Литолого-стратиграфическая характеристика домеловых отложений платформенного чехла юго-западной Беларуси (по результатам изучения скважины Комаровка 913/10) / Д. П. Плас [и др.] // *Літасфера*. – 2012. – № 2 (37). – С. 3–21.
21. Экостратиграфия: результаты исследований силурийских отложений белорусской части Подляско-Брестской впадины / В. И. Пушкин [и др.] ; под ред. А. С. Махнача. – Минск : Наука и техника, 1991. – 48 с.
22. Абушик, А. В. Силурийские и раннедевонские брахиоподы и остракоды Беларуси / А. В. Абушик, Т. Л. Модзалевская, Т. И. Моисеева. – СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. – 126 с.
23. Пашкевичюс, И. Ю. Лудловские граптолитовые зоны белорусской части Подляско-Брестской впадины / И. Ю. Пашкевичюс, В. И. Пушкин // Граптолиты в истории Земли : тез. докл. V симп. по изучению граптолитов в СССР. – Вильнюс, 1988. – С. 36–43.
24. Märss, T. Revision of Silurian vertebrate biozones and their correlation with the conodont succession / T. Märss, P. Männik // *Estonian Journal of Earth Sciences*. – 2013. – Vol. 62, №4. – P. 181–204.
25. Brazauskas, A. Brachiopod and conodont distribution at the Wenlock-Ludlow boundary of Lithuania / A. Brazauskas, P. Musteikis // *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology*. – 1991. – Vol. 40, № 2. – P. 61–68.
26. Плас, Д. П. О находках агнат и рыб в силурийских отложениях Подляско-Брестской впадины (Беларусь) / Д. П. Плас // Актуальные проблемы современной геологии, геохимии и географии : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 28–30 сент. 2011 г. : в 2 ч. / Брестский гос. ун-т ; редкол.: М. А. Богдасаров [и др.]. – Брест, 2011. – Ч. 1 : Геология, геохимия. – С. 159–161.
27. Моисеева, Т. И. О расчленении верхнего силура Брестской впадины / Т. И. Моисеева // Доклады АН БССР. – 1973. – Т. 17, № 6. – С. 545–548.
28. Пашкевичюс, И. Ю. Биостратиграфия и граптолиты силура Литвы / И. Ю. Пашкевичюс. – Вильнюс : Мокслас, 1979. – 267 с.
29. Константиненко, Л. И. Силурийська система / Л. И. Константиненко, П. Д. Цегельнюк // Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України : у 2 т. – Київ : ІГН НАН України ; Логос, 2013. – Т. 1 : Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою України / гол. ред. П. Ф. Гожик. – С. 176–195.
30. Сидравичене, Н. В. Силурийская система / Н. В. Сидравичене, П. П. Лапинскас, В. И. Пушкин // Геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 1 000 000 (новая серия). Объяснительная записка. Лист IV (34), (35) Вильнюс. – Л. : Изд-во ВСЕГЕИ, 1986. – С. 43–53.
31. Плас, Д. П. Ихтиофауна из пржиждольских отложений скважины Кустинская 1-оп (Подляско-Брестская впадина, Беларусь) / Д. П. Плас // Фундаментальные основы палеонтологии: теория и практика : материалы LXXI сессии Палеонтол. об-ва при РАН / редкол.: М. А. Ткаченко [и др.]. – СПб. : Ин-т Карпинского, 2025. – С. 243–244.
32. Пушкин, В. И. Детализация стратиграфической схемы силура белорусской части Подляско-Брестской впадины / В. И. Пушкин, В. Ф. Ропот // Доклады АН БССР. – 1989. – Т. 33, № 11. – С. 1091–1024.
33. Цегельнюк, П. Д. Стратиграфия отложений силура и нижнего девона Полесского погребенного массива и Брестской впадины / П. Д. Цегельнюк // Палеонтология и стратиграфия верхнего докембрия и нижнего палеозоя юго-запада Восточно-Европейской платформы. – Киев : Наук. думка, 1976. – С. 77–91.
34. Положение границы силур-девон в скважине Томашовка 11 (юго-западная часть БССР) / А. Ф. Абушик [и др.] // Доклады АН БССР, 1982. – Т. 10, № 6. – С. 533–536.
35. Обуховская, Т. Г. Девонская система / Т. Г. Обуховская, С. А. Кручек, В. И. Пушкин, Н. С. Некрята, Д. П. Плас, Т. Ф. Саченко, В. Ю. Обуховская, С. В. Антипенко // Стратиграфические схемы докембрийских и фанерозойских отложений Беларуси : объяснительная записка. – Минск : БелНИГРИ, 2010. – С. 98–114.
36. Plax, D. P. Thelodonts (Agnatha) from the Lower Silurian (Wenlock) deposits of the north-west of Belarus / D. P. Plax, T. Märss // *Літасфера*. – 2011. – № 1 (34). – С. 69–81.
37. Кручек, С. А. О силурийских отложениях Островецкой площадки северо-западной части Белорусской антеклизы / С. А. Кручек, Д. П. Плас, В. Ю. Обуховская // *Літасфера*. – 2014. – № 2 (41). – С. 27–39.
38. Плас, Д. П. Новые местные стратиграфические подразделения верхнего силура и среднего девона северо-западной части Белорусской антеклизы / Д. П. Плас, С. А. Кручек, В. Ю. Обуховская // *Літасфера*. – 2016. – № 1 (44). – С. 3–25.
39. Lower Silurian biostratigraphy of the Viirelaid core, western Estonia / M. Rubel [et al.] // *Estonian Journal of Earth Sciences*. – 2007. – Vol. 4, № 56. – P. 193–204.

40. Calner, M. The Silurian of Gotland – part I: review of the stratigraphic framework, event stratigraphy, and stable carbon and oxygen isotope development / M. Calner, L. Jeppsson, A. Munnecke // *Erlanger geologische Abhandlungen – Sonderband.* – 2004. – № 5. – P. 113–131.
41. Jeppsson, L. A latest Llandovery to latest Ludlow high-resolution biostratigraphy based on the Silurian of Gotland – a summary / L. A. Jeppsson, M. E. Eriksson, M. Calner // *GFF.* – 2006. – Vol. 128, № 2. – P. 109–114.
42. Bremer, O. Silurian vertebrates of Gotland (Sweden) and the Baltic Basin / O. Bremer // *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology.* – Uppsala : Acta Universitatis Upsaliensis, 2017. – 61 p.
43. Märss, T. *Loganellia* (Thelodonti, Agnatha) from the Jaagarahu stage, Wenlock, Estonia / T. Märss // *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences: Geology.* – 1996. – Vol. 45, № 4. – P. 189–202.
44. Fredholm, D. Agnathan vertebrates in the Lower Silurian of Gotland, Sweden / D. Fredholm // *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar.* – 1990. – Vol. 112, № 1. – P. 61–84.
45. Стратиграфические подразделения Литвы. Вяркенская свита (слои, горизонт) / Н. Сидаравичене [и др.]. – Вильнюс : Геол. ин-т, 1999. – С. 263.
46. Lapinskas, P. Structure & Petroliferosity of the Silurian in Lithuania / P. Lapinskas. – Vilnius : Institute of Geology, 2000. – 203 p.
47. Upper Wenlock $\delta^{13}\text{C}$ chemostratigraphy, conodont biostratigraphy and palaeoecological dynamics in the Ledai-179 drill core (Eastern Lithuania) / S. Radzevičius, A. Spiridonov, A. Brazauskas // *Estonian Journal of Earth Sciences.* – 2014. – Vol. 63, № 4. – P. 293–299.

References

1. Pushkin V. I. *Siluriyskaya sistema* [The Silurian system]. *Geologiya Belarusi = Geology of Belarus*, 2001, pp. 171–186. (in Russian)
2. Pushkin V. I. *Siluriyskaya sistema* [The Silurian system]. *Osnovy geologii Belarusi = Fundamentals of the geology of Belarus*, 2004, pp. 102–108. (in Russian)
3. Pushkin V. I. *Stratigraficheskaya skhema Siluriyskikh otlozheniy Belarusi* [Stratigraphic chart of the Silurian deposits of Belarus]. *Litosfera = Lithosphere*, 2005, no. 1 (22), pp. 62–68. (in Russian)
4. Pushkin V. I. *Siluriyskaya sistema* [The Silurian system]. *Stratigraficheskie skhemy dokembriyskikh i fanerozoyskikh otlozheniy Belarusi: Ob'yasnitel'naya zapiska = Stratigraphic charts of Precambrian and Phanerozoic deposits of Belarus: Explanatory note.* Minsk, State Enterprise "BelNGRI" Publ., 2010, pp. 93–98. (in Russian)
5. Makhnach A. S. *Stratigraficheskaya skhema drevnepaleozoyskikh otlozheniy Belorussii* [The stratigraphic chart of ancient Paleozoic deposits of Byelorussia]. *Doklady Akademii Nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1956, no. 5 (110), pp. 831–834. (in Russian)
6. Makhnach A. S. *Drevnepaleozoyskie otlozheniya Belorussii* [Ancient Paleozoic deposits of Byelorussia]. Minsk, Institute of Geol. Sciences of the Academy of Sciences of the BSSR Publ., 1958, 226 p. (in Russian)
7. Golubtsov V. K., Makhnach A. S. *Fatsii territorii Belorussii v paleozoe i rannem mezozoe* [The facies of the territory of Byelorussia in Paleozoic and early Mesozoic]. Minsk, Academy of Sciences of the Belorussian SSR Publ., 1961, 188 p. (in Russian)
8. Zinovenko G. V., Vernikovsky I. I. *Siluriyskie otlozheniya Podlyassko-Brestskoy vpadiny* [The Silurian deposits of the Podlasie-Brest Depression]. *Voprosy geologii territorii BSSR i nekotorykh smezhnykh rajonov USSR = Questions of the geology of the territory of the BSSR and some related regions of the Ukrainian SSR*, 1970, pp. 54–63. (in Russian)
9. Sinichka A. M., Zinovenko G. V., Bessonova V. Ya., Zhitskaya Z. V. *Kustinskaya opornaya skvazhina Brestskoy vpadiny* [The Kustin reference borehole of the Brest Depression]. Moscow, Nedra Publ., 1970, 143 p. (in Russian)
10. Pushkin V. I., Zinovenko G. V., Moiseeva T. I., Piskun L. V., Ropot V. F. *Stratigraficheskaya skhema siluriyskikh otlozheniy Belorussii* [The Stratigraphic chart of the Silurian deposits of Byelorussia]. *Materialy po stratigrafii Belorussii (k Mezhhvedomstvennomu stratigraficheskomu soveshchaniyu) = Materials on the stratigraphy of Byelorussia (to the interdepartmental stratigraphic meeting)*, 1981, pp. 41–46. (in Russian)
11. *Resheniya Mezhhvedomstvennogo regional'nogo stratigraficheskogo soveshchaniya po razrabotke unifikirovannykh stratigraficheskikh skhem Belorussii, 1981* [Decisions of the interdepartmental regional stratigraphic meeting on the development of unified stratigraphic charts of Byelorussia, 1981] (with unified stratigraphic correlation tables). Leningrad, VSEGEI Publ., 1983. (in Russian)
12. Cohen K. M., Finney S. C., Gibbard P. L., Fan J.-X. The ICS International Chronostratigraphic Chart 2024/12. International Commission on Stratigraphy, IUGS. Available at: www.stratigraphy.org (accessed September 3, 2025).
13. *Obshchaya stratigraficheskaya shkala* [General stratigraphic chart]. Interdepartmental Stratigraphic Committee of Russia (MSC), 2024. Available at: https://karpinskyinstitute.ru/info/str_scale-03-24.pdf (accessed September 3, 2025). (in Russian)
14. *Postanovleniya Mezhhvedomstvennogo stratigraficheskogo komiteta i ego postoyannykh komissiy* [Decisions of the interdepartmental stratigraphic committee and its standing commissions]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2013, 64 p. (in Russian)
15. Melchin M. J., Sadler P. M., Cramer B. D. The Silurian Period. *Geologic Time Scale 2020*. Elsevier, 2020, vol. 2, pp. 695–732.
16. Plax D. P. *Stratigraficheskoe rasprostranenie ostatkov ikhtiofauny v siluriyskikh otlozheniyakh Belarusi* [The stratigraphic distribution of the ichthyofauna remains in the Silurian deposits of Belarus]. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle: ispol'zovanie prirodnih resursov i sohranenie okruzhayushchej sredy. Materialy V Mezhdunar. nauch.-*

- prakt. konf.* [Proc. of the V Int. Sci. and practical conf. "Actual problems of the Earth sciences: the use of natural resources and the preservation of the environment"]. Brest, 2021, part 1, pp. 121–124. (in Russian)
17. Plax D. P. Pridolian ichthyofauna of Belarus. *Litosfera = Lithosphere*, 2023, no. 1 (58), pp. 26–47.
 18. Tomczyk E., Tomczyk H. Stratigraphy of the Polish Silurian and Lower Devonian and development of the Proto-Tethys. *Acta Palaeontologica Polonica*, 1979, vol. 24, no. 1, pp. 185–183.
 19. *Resheniya Mezhdunarodnogo stratigraficheskogo soveshchaniya po ordovikskoy i siluriyskoy sistemam Vostochno-Evropeyskoy platformy* [Decisions of the International Stratigraphic Conference on the Ordovician and Silurian Systems of the East European Platform]. Leningrad, VSEGEI Publ., 1987, 114 p. (in Russian)
 20. Plax D. P., Kuzmenkova O. F., Obukhovskaya V. Yu., Sachenko T. F., Voskoboinikova T. V., Klimenko Z. M., Bibikova E. V., Karimova L. A. *Litologo-stratigraficheskaya kharakteristika domelovykh otlozheniy platformennogo chekhla yugo-zapadnoy Belarusi* [Lithologic and stratigraphic characteristics of the Precretaceous deposits of the platform cover of southwestern Belarus (from the results of the studying the Komarovka 913/10 borehole)]. *Litosfera = Lithosphere*, 2012, no. 2 (37), pp. 3–21. (in Russian)
 21. Pushkin V. I., Ropot V. F., Abushik A. F., Brazauskas A. Z., Grishchenko V. L., Kruchek S. A., Modzalevskaya T. L., Moiseeva T. I., Männil R. M., Paškevičius I. J., Piskun L. V. *Ekostatigrafiya: rezul'taty issledovaniy siluriyskikh otlozheniy belorusskoy chasti Podlyassko-Brestskoy vpadiny* [Ecostratigraphy: the results of investigations of the Silurian deposits of the Byelorussian part of the Podlasie-Brest Depression]. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1991, 48 p. (in Russian)
 22. Abushik A. V., Modzalevskaya T. L., Moiseeva T. I., Pushkin V. I. *Siluriyskie i rannedevonskie brachiopody i ostrakody Belarusi* [Silurian and Early Devonian brachiopods and ostracods of Belarus]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2007, 126 p. (in Russian)
 23. Paškevičius I. J., Pushkin V. I. *Ludlovskie graptolitovye zony belorusskoy chasti Podlyassko-Brestskoy vpadiny* [The Ludlovian graptolite zones of the Byelorussian part of the Podlasie-Brest Depression]. *Graptolity v istorii Zemli: Tezisy dokladov V simpoziuma po izucheniyu graptolitov v SSSR = Graptolites in the history of the Earth: Abstracts of reports V Symposium on the study of graptolites in the USSR*. Vilnius, 1988, pp. 36–43. (in Russian)
 24. Märss T., Männik P. Revision of Silurian vertebrate biozones and their correlation with the conodont succession. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2013, no. 4 (62), pp. 181–204.
 25. Brazauskas A., Musteikis P. Brachiopod and conodont distribution at the Wenlock-Ludlow boundary of Lithuania. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology*, 1991, no. 2 (40), pp. 61–68.
 26. Plax D. P. *O nakhodkakh agnat i ryb v siluriyskikh otlozheniyakh Podlyassko-Brestskoy vpadiny (Belarus')* [On the findings of the agnathans and fishes in the Silurian deposits of the Podlasie-Brest Depression (Belarus)]. *Aktual'nye problemy sovremennoy geologii, geohimii i geografii: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. of the Int. Sci. and Pract. Conf. "Actual problems of modern geology, geochemistry and geography"]. Brest, 2011, part 1: Geology, geochemistry, pp. 159–161. (in Russian)
 27. Moiseeva T. I. *O raschlenenii verkhnego silura Brestskoy vpadiny* [On the subdivision of the Upper Silurian deposits of the Brest Depression]. *Doklady Akademii Nauk BSSR = Proc. of the Academy of Sciences of the BSSR*, 1973, vol. XVII, no. 6, pp. 545–548. (in Russian)
 28. Paškevičius I. J. *Biostratigrafiya i graptolity silura Litvy* [Biostratigraphy and graptolites of the Silurian of Lithuania]. Vilnius, Mokslas Publ., 1979, 267 p. (in Russian)
 29. Konstantynenko L. I., Tsegel'nyuk P. D. *Syluriys'ka systema* [The Silurian system]. *Stratigrafiya verhn'ogo proterozoyu ta fanerozoyu Ukraini u dvoh tomah. T. 1: Stratigrafiya verhn'ogo proterozoyu, paleozoyu ta mezozoyu Ukraini* [Stratigraphy of Upper Proterozoic and Phanerozoic of Ukraine in two volumes. Vol. 1: Stratigraphy of Upper Proterozoic, Paleozoic and Mesozoic of Ukraine]. Kyiv, Logos Publ., 2013, pp. 176–195. (in Ukrainian)
 30. Sidravičienė N. V., Lapinskas P. P., Pushkin V. I. *Siluriyskaya sistema* [The Silurian system]. *Geologicheskaya karta SSSR. Masshtab 1 : 1 000 000 (novaya seriya). Ob'yasnitel'naya zapiska. List IV (34), (35)* [Geological map of the USSR. Scale 1 : 1 000 000 (new series). Explanatory note. Sheet IV (34), (35)]. Vilnius, Leningrad, VSEGEI Publ., 1986, pp. 43–53. (in Russian)
 31. Plax D. P. *Ikhtiofauna iz przhidol'skikh otlozheniy skvazhiny Kustinskaya 1-op (Podlyassko-Brestskaya vpadina, Belarus')* [Ichthyofauna from the Pridolian deposits of the Kustin 1-op borehole (Podlasie-Brest Depression, Belarus)]. *Fundamental'nye osnovy paleontologii: teoriya i praktika Materialy LXXI sessii Paleontologicheskogo obshchestva pri RAN* [Proc. of the LXXI session of the Paleontological Society at the Russian Academy of Sciences "The Fundamental Foundations of Paleontology: Theory and Practice"]. St. Petersburg, Institute of Karpinsky Publ., 2025, pp. 243–244. (in Russian)
 32. Pushkin V. I., Ropot V. F. *Detalizatsiya stratigraficheskoy skhemy silura belorusskoy chasti Podlyassko-Brestskoy vpadiny* [Detailization of the stratigraphic chart of the Silurian of the Byelorussian part of the Podlasie-Brest Depression]. *Doklady Akademii Nauk BSSR = Proc. of the Academy of Sciences of the BSSR*, 1989, no. 11 (33), pp. 1091–1024. (in Russian)
 33. Tsegel'nyuk P. D. *Stratigrafiya otlozheniy silura i nizhnego devona Poleskogo pogrebnennogo massiva i Brestskoy vpadiny* [Stratigraphy of the Silurian and Lower Devonian deposits of the Polesie Buried Massif and the Brest Depression]. *Paleontologiya i stratigrafiya verhnego dokembriya i nizhnego paleozoya yugo-zapada Vostochno-Evropeyskoy platformy = Paleontology and stratigraphy of the Upper Precambrian and Lower Paleozoic of the south-west of the East European platform*. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1976, pp. 77–91. (in Russian)
 34. Abushik A. F., Kruchek S. A., Moiseeva T. I., Pushkin V. I. *Polozhenie granitsy cilur-devon v skvazhine Tomashovka 11 (yugo-zapadnaya chast' BSSR)* [Position of the Silurian-Devonian boundary in the Tomashovka 11 borehole (southwestern part of the BSSR)]. *Doklady Akademii Nauk BSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of the BSSR*, 1982, no. 6 (10), pp. 533–536. (in Russian)
 35. Obukhovskaya T. G., Kruchek S. A., Pushkin V. I., Nekryata N. S., Plax D. P., Sachenko T. Ph., Obukhovskaya V. Yu., Antipenko S. V. *Devonskaya sistema* [The Devonian system]. *Stratigraficheskie skhemy dokembriyskikh i fanerozojskikh otlozheniy Belarusi: Ob'yasnitel'naya zapiska = Stratigraphic charts of Precambrian and*

- Phanerozoic deposits of Belarus: Explanatory note*. Minsk, State Enterprise "BelNIGRI" Publ., 2010, pp. 98–114. (with stratigraphic charts of the Devonian deposits of Belarus (2 sheets). (in Russian)
36. Plax D. P., Märss, T. Thelodonts (Agnatha) from the Lower Silurian (Wenlock) deposits of the north-west of Belarus. *Litosfera = Lithosphere*, 2011, no. 1 (34), pp. 69–81.
 37. Kruchek S. A., Plax D. P., Obukhovskaya V. Yu. O *siluriyskikh otlozheniyakh Ostrovetskoy ploschadki severo-zapadnoy chasti Belorusskoy Anteklizy* [Silurian deposits of the Ostrovets area in the northwestern part of the Belarusian Antecline]. *Litosfera = Lithosphere*, 2014, no. 2 (41), pp. 27–39. (in Russian)
 38. Plax D. P., Kruchek S. A., Obukhovskaya V. Yu. *Novye mestnye stratigraficheskie podrazdeleniya verkhnego silura i srednego devona severo-zapadnoy chasti Belorusskoy Anteklizy* [New local stratigraphic units of the Upper Silurian and Middle Devonian of the northwestern part of the Belarusian Antecline]. *Litosfera = Lithosphere*, 2016, no. 1 (44), pp. 3–25. (in Russian)
 39. Rubel M., Hints O., Männik P., Meidla T., Nestor V., Sarv L., Sibul I. Lower Silurian biostratigraphy of the Viirelaid core, western Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2007, no. 56 (4), pp. 193–204.
 40. Calner M., Jeppsson L., Munnecke A. The Silurian of Gotland – part I: review of the stratigraphic framework, event stratigraphy, and stable carbon and oxygen isotope development. *Erlanger geologische Abhandlungen – Sonderband*, 2004, no. 5, pp. 113–131.
 41. Jeppsson L., Eriksson M. E., Calner M. A latest Llandovery to latest Ludlow high-resolution biostratigraphy based on the Silurian of Gotland – a summary. *GFF*, Stockholm, 2006, vol. 128, pt. 2, pp. 109–114.
 42. Bremer O. Silurian vertebrates of Gotland (Sweden) and the Baltic Basin. *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 1544*. Uppsala, Acta Universitatis Upsaliensis Publ., 2017, 61 p.
 43. Märss T. *Loganellia* (Thelodonti, Agnatha) from the Jaagarahu stage, Wenlock, Estonia. *Proc. Estonian Acad. Sci. Geol.*, 1996, no. 45(4), pp. 189–202.
 44. Fredholm D. Agnathan vertebrates in the Lower Silurian of Gotland, Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Föreläsningar*, 1990, no. 1(112), pp. 61–84.
 45. Sidaravičienė N., Valiukevičius J., Paškevičius I., e.a. *Stratigraficheskie podrazdeleniya Litvy. Vyarkneskaya svita (sloi, gorizont)* [Lithuanian stratigraphic units. Verknė Formation (Beds, Regional Stages)]. Vilnius, Geological Institute Publ., 1999, 263 p. (in Russian, Lithuanian and English).
 46. Lapinskas P. Structure & Petroliferosity of the Silurian in Lithuania. Vilnius, Institute of Geology Publ., 2000, 203 p. (in Lithuanian).
 47. Radzevičius S., Spiridonov A., Brazauskas, A., Norkus A., Meidla T., Ainsaar L. Upper Wenlock $\delta^{13}\text{C}$ chemostratigraphy, conodont biostratigraphy and palaeoecological dynamics in the Ledai-179 drill core (Eastern Lithuania). *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2014, no. 63 (4), pp. 293–299.

Информация об авторе

Плакс Дмитрий Петрович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, доцент кафедры «Горные работы», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь). E-mail: agnatha@mail.ru

Information about the author

Dmitry P. Plax – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Associate Professor of the Department of Mining, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus). E-mail: agnatha@mail.ru

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

УДК 662.62:662.63:632.93

Поступила в редакцию 28.10.2025
Received 28.10.2025

АНТИМИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ ПРЕПАРАТОВ ИЗ СФАГНОВОГО ТОРФА И СФАГНОВОГО МХА С МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ

Н. А. Жмакова¹, Н. Л. Макарова¹, Е. А. Семенчукова², А. А. Муратова²

¹Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

²Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Настоящее исследование направлено на разработку комплексных препаратов на основе сфагнового торфа, сфагнового мха и микроэлементов и первичные исследования их антимикробной активности на чистых культурах возбудителей болезней сельскохозяйственных растений с целью определения возможности получения на их основе средств защиты растений. В оксидаты и гидролизаты сфагнового мха и сфагнового торфа малой степени разложения, содержащие незначительные количества гуминовых кислот, микроэлементы внесены в виде солей. В гуматсодержащие препараты их введение проводили в форме комплексонатов металлов. В качестве комплексона использовали динатриевую соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА). Установлены условия получения эдетата цинка, марганца, меди и его введения в состав оксидатов. Для приготовления комплексных препаратов EDTA–Zn₇₀–Mn₅₀–Cu₂₅ вносили в оксидаты в соотношении 1 : 10, при этом содержание микроэлементов в конечных продуктах составило Zn_{7,0}, Mn_{5,0}, Cu_{2,5}. Показано, что комплексный препарат на основе оксидата магелланикум-торфа со степенью разложения (*R*) 5 % и микроэлементов активен в отношении фитопатогенов *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* Н.П. и *Erwinia amylovora* E2, а препарат на основе магелланикум-торфа с *R* 20–25 % и хелатов микроэлементов – в отношении *C. michiganensis* subsp. *michiganensis* Н.П. Гидролизаты мха и торфа с *R* 5 % проявляют активность в отношении *E. amylovora* E2 и *Pseudomonas corrugata* 3'. Таким образом, установлено, что препараты, полученные на основе сфагнового торфа, сфагнового мха и микроэлементов, обладают активностью в отношении ряда фитопатогенных микроорганизмов и могут быть использованы при разработке средств защиты растений нового поколения.

Ключевые слова: сфагновый торф; сфагновый мох; гидролиз; окисление; физико-химические свойства; комплексоны; комплексонаты; микроэлементы; антимикробная активность.

Для цитирования. Жмакова Н. А., Макарова Н. Л., Семенчукова Е. А., Муратова А. А. Антимикробная активность препаратов из сфагнового торфа и сфагнового мха с микроэлементами // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 146–155.

ANTIMICROBIAL ACTIVITY OF PREPARATIONS FROM SPHAGNUM PEAT AND SPHAGNUM MOSS WITH MICROELEMENTS

N. A. Zhmakova¹, N. L. Makarova¹, E. A. Semenchukova², A. A. Muratova²

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

²Institute of Microbiology, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The present study is aimed at the development of complex preparations based on sphagnum peat, sphagnum moss and microelements and primary studies of their antimicrobial activity on pure crops of pathogens of agricultural plants in order to determine the possibility of obtaining plant protection products based on them. Microelements are added in the form of salts to the oxidates and hydrolysates of sphagnum moss and sphagnum peat of low decomposition, containing small amounts of humic acids. Their introduction into humate-containing preparations was carried out in the form of metal complexonates. Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) disodium salt was used as the

complexone. The conditions for obtaining zinc, manganese and copper edetate and its introduction into the composition of oxidates have been established. For the preparation of complex preparations, EDTA–Zn₇₀–Mn₅₀–Cu₂₅ was added to the oxidates in a ratio of 1 : 10, and the content of trace elements in the final products was Zn_{7.0}, Mn_{5.0}, Cu_{2.5}. It has been shown that a complex preparation based on magellanicum peat oxidate with a degree of decomposition (*R*) of 5 % and microelements is active against the phytopathogens *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* N.P. and *Erwinia amylovora* E2, and a preparation based on magellanicum peat with *R* 20–25% and chelates of microelements – in relation to *C. michiganensis* subsp. *michiganensis* N.P. Moss and peat hydrolysates with *R* 5 % are active against *E. amylovora* E2 and *Pseudomonas corrugata* 3'. Thus, it has been established that preparations obtained on the basis of sphagnum peat and sphagnum moss and microelements have activity against a number of phytopathogenic microorganisms and can be used in the development of new generation plant protection products.

Keywords: sphagnum peat; sphagnum moss; hydrolysis; oxidation; physicochemical properties; complexons; complexonates; microelements; antimicrobial activity.

For citation. Zhmakova N. A., Makarova N. L., Semenchukova E. A., Muratova A. A. Antimicrobial activity of preparations from sphagnum peat and sphagnum moss with microelements. *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 146–155.

Введение. Химическая трансформация природных соединений торфа и болотных растений может приводить к получению продуктов, обладающих противобактериальными, противовирусными, фунгицидными свойствами. Препараты антимикробного действия на основе этого природного сырья могут быть получены при химической деструкции, когда под действием некоторых реагентов происходит извлечение биологически активных соединений, расщепление высокомолекулярных компонентов торфа с образованием низкомолекулярных соединений, отдельные из которых обладают выраженной биоцидной активностью. Однако разработка новых антипатогенных природных средств до сих пор не доведена до конечных целей, несмотря на то что эти препараты обладают широким спектром действия и безопасны в отличие от синтетических аналогов.

Предыдущими работами авторов установлено, что продукты окислительной деструкции и бескислотного гидролиза сфагновых мха и торфа проявляют антибактериальный эффект в отношении ряда возбудителей болезней растений [1].

Дальнейшей задачей исследований являлось усиление антимикробных свойств разработанных ранее препаратов, показавших повышенную активность против ряда патогенных микроорганизмов. Одним из путей достижения этой цели может быть введение в их состав микроэлементов, проявляющих биоцидный эффект. Известно, что биоцидной активностью обладают соединения меди, цинка, марганца и некоторых других металлов. В состав оксидатов и гидролизатов мха и сфагнового торфа малой степени разложения, содержащих незначительные количества гуминовых кислот, небольшие дозы микроэлементов могут быть введены в виде солей. Одним из компонентов препаратов, полученных на основе торфа более высокой степени разложения, являются гуминовые вещества, которые растворимы только в форме солей одновалентных металлов (натрия, калия) и аммония. Гуматы двух-, трех- и многовалентных металлов нерастворимы и в процессе получения препаратов остаются в твердом остатке, а при введении в раствор гуминовых кислот выпадают в осадок. Одним из надежных способов введения ионов двух-, трех- и многовалентных микроэлементов в состав гуматсодержащих препаратов является их внесение в виде веществ, способных образовывать с ионами металлов растворимые комплексные соединения, т. е. в виде их устойчивых соединений с комплексонами.

Комплексоны – это органические вещества (ОВ) с большим количеством реакционных центров. Они содержат в своем составе способные к координации атомы азота, серы или фосфора (N, S, P), а также карбоксильные, фосфоновые и другие функциональные группы, образующие с катионами металлов внутрикомплексные соединения – комплексонаты или хелаты. Высокая прочность таких соединений обусловлена образованием устойчивых специфических химических связей, которые присущи органическим молекулам, имеющим в своем составе разнообразные активные функциональные группы [2–6].

Комплексные соединения состоят из центрального атома или иона и координированных, т. е. расположенных вокруг него, молекул или ионов лигандов. Характерной особенностью комплексона является его координационная емкость (или полидентатность) – количество атомов или групп атомов, связанных с центральным ионом. Обычно молекула комплексона содержит несколько функциональных электронодонорных групп, часть которых имеет кислотную, а часть – основную природу. При этом хелаты металлов, получаемые с использованием комплексонов, имеют на порядок большую растворимость, чем соли.

Среди комплексонов к наиболее хорошо изученным и широко применяемым относятся этилендиаминтетрауксусная кислота (ЭДТА), оксиэтилидендифосфоновая кислота (ОЭДФ), нитрилтриуксусная кислота (НТА), нитрилтриметиленфосфоновая кислота (НТФ).

Одним из первых и наиболее распространенных комплексонов является динатриевая соль ЭДТА, которая обладает комплексообразующей способностью в широком диапазоне pH – в нейтральной и щелочной средах, и проявляет ее при введении в незначительных концентрациях.

Молекула ЭДТА ($C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$), являясь в целом электронейтральной, имеет в своей структуре функциональные группы, несущие как отрицательный, так и положительный заряды, и содержит четыре кислотных и два основных центра, т. е. относится к биполярным ионам. Наличие полидентатных лигандов и взаимное расположение этих центров делает ЭДТА одним из наиболее эффективных действующих и универсальных комплексонов.

В кислом растворе ЭДТА протонируется, образуя катионы кислот $H_5ЭДТА^+$ и $H_6ЭДТА^{2+}$ или анион четырехосновной кислоты $ЭДТА^{4-}$. Формула комплексона показывает, что анион $ЭДТА^{4-}$ является потенциально декадентатным: координация может осуществляться через два атома азота и восемь атомов кислорода – четыре атома карбоксильных и четыре атома карбонильных групп. Однако пространственная структура не позволяет молекуле ЭДТА иметь дентатность выше шести: в координации могут участвовать два атома азота и четыре атома кислорода карбоксильных групп.

Отличительными чертами молекулы ЭДТА как лиганда являются ее высокая гибкость и широкое варьирование межатомных расстояний $M-O$ и $M-N$ в комплексах различных металлов, что снимает многие геометрические ограничения и обеспечивает достаточную универсальность действия комплексона. Взаимодействие ЭДТА с катионами приводит к образованию растворимых в воде очень устойчивых комплексов в широком интервале pH – от 4,0 до 12,0.

Среди комплексонов с фосфоновыми группами наиболее полно охарактеризована НТФ – $N(CH_2PO_3H_2)_3$. Фрагмент $CH_2PO_3H_2$ имеет форму искаженного тетраэдра и обладает более высокой дентатностью по сравнению с карбоксилатом, имеющим плоскую координацию [7, 8]. НТФ – сильная шестисосновная кислота – образует соли с неорганическими и органическими основаниями. Она хорошо растворима в воде (до 3 моль/л) и в широком диапазоне pH образует прочные устойчивые комплексы с катионами металлов.

Существенный интерес представляют алкилдифосфоновые кислоты, проявляющие высокую специфичность взаимодействия с рядом катионов. Важным представителем этих кислот является ОЭДФ – $C_2H_8O_7P_2$, содержащая две фосфоновые группы, способные к комплексообразованию в сильнокислой среде, и оксиэтильную группу.

ОЭДФ относится к классу дифосфоновых кислот, обладающих высокой комплексообразующей способностью и стойкостью к гидролизу. ОЭДФ хорошо растворима в воде, кислотах, щелочах, метаноле и этаноле. Комплексон образует устойчивые комплексы практически со всеми катионами, включая катионы щелочных и щелочноземельных металлов [7, 8].

Эти комплексоны выпускаются в больших объемах промышленностью России и других стран, они доступны и сравнительно недороги. Стереохимия данных соединений обеспечивает высокую прочность хелатов, однако они избирательны по отношению к ряду катионов. В связи с этим возникла необходимость провести исследования по определению условий получения комплексонатов цинка, меди, марганца и их введения в состав гуматсодержащих препаратов.

Материалы и методы исследований. Объектами исследований являлись два образца сфагнового торфа сфагнум-магелланикум *Sphagnum magellanicum* со степенью разложения (R) 5 и 20–25 % и один образец сфагнового мха *Sph. magellanicum* (сфагнум-магелланикум). Магелланикум-торф малой степени разложения отбирали из залежи на торфяном месторождении «Червоное» Червенского района Минской области, там же был отобран и магелланикум-мох. Магелланикум-торф со степенью разложения 15–20 % отобран из штабеля на торфопредприятии «Сосновый бор» Смолевичского района Минской области (торфяное месторождение «Радемье»). Геоботаническая и физико-химическая характеристики исходных проб торфа и мха, а также их компонентный состав представлены в работе [1].

Для наработки опытных образцов препаратов использовали лабораторные автоклавы, изготовленные из нержавеющей стали, объемом 500 мл. В автоклавы загружали навески исходного сырья – сфагнового торфа или мха, необходимое количество реагентов и воды. Гидро модуль для мха составлял 1 : 34, для торфа малой степени разложения (5 %) – 1 : 30, для торфа со степенью разложения 20–25 % – 1 : 12. Аппараты герметично закрывали, содержимое взбалтывали в течение 4–5 мин, а затем помещали в термостаты и выдерживали при нагревании в заданных температурных режимах необходимое время. Окисленную или прогидролизованную суспензию мха и торфа разделяли на лабораторной центрифуге для получения жидкого целевого продукта и твердого остатка (отхода).

На основе наработанных оксидатов и гидролизатов получили комплексные препараты, содержащие микроэлементы, известные своей биоцидной активностью: цинк, медь, марганец. Для стабилизации водных растворов микроэлементов при введении в препараты использовали их хелаты с комплексонами: ОЭДФ, динатриевой солью ЭДТА, НТФ.

Фитотоксичность различных доз (0,001–0,01 %) препаратов проводили в соответствии с методическими указаниями ГОСТ 12038-84 «Методы определения всхожести семян сельскохозяйственных культур» на семенах ячменя. Для этого семена замачивали в растворах препаратов соответствующей концентрации в течение 24 ч, после чего раскладывали по 50 шт. между двумя слоями увлажненной

фильтровальной бумаги и помещали в термостат при температуре 25 °С. Энергию прорастания семян определяли на 3-й день, их всхожесть – на 7-й день.

При выполнении физико-химической характеристики опытных образцов препаратов, полученных из мха и торфа, их цвет оценивали визуально, запах – органолептически, плотность измеряли ареометром, реакцию среды – при помощи иономера И-120.1. Для определения оптической плотности препараты разбавляли в 100 раз дистиллированной водой и измеряли на спектрофотометре КФК-3 при длине волны 540 нм. Массовую долю сухих веществ определяли весовым методом, массовую долю ОВ в составе препаратов – по разности массы абсолютно сухих веществ, высушенных при температуре 90 °С и веществ, оставшихся после сжигания в муфельной печи при температуре 600 °С.

Специалистами Института микробиологии НАН Беларуси проведены исследования антимикробной активности комплексных препаратов в отношении трех грибных (*B. cinerea* БИМ F-551, *F. oxysporum* 381 и *Alternaria* sp. F4) и пяти бактериальных (*C. michiganensis* subsp. *michiganensis* Н.П., *P. corrugata* 3', *P. syringae* pv. *tomato* DC3000, *E. amylovora* E2, *Pec. carotovorum* 25.1) фитопатогенов, способных вызывать ряд заболеваний сельскохозяйственных культур.

Для определения антимикробной активности образцов использовали модифицированный метод отсроченного антагонизма: 500 мкл ночной культуры фитопатогена переносили к 4,5 мл культуры, разогретой до температуры 40–45 °С на агаризованной питательной среде (полноценный питательный агар – ППА) с содержанием агар-агара 0,7 %, и интенсивно перемешивали. Затем наслаивали на чашки Петри с 20 мл застывшего питательного 2%-го ППА-агара. После полного застывания среды на чашках Петри на поверхность агара наносили по 15 мкл тестируемых образцов и контрольный раствор в количестве 15 мкл. Чашки инкубировали при температурах 24–30 °С в течение 24–48 ч. Результаты оценивали визуально, измеряя зоны задержки роста. Эксперимент проводили в трех биологических повторностях. Указанная методика подробно описана в работах [1, 9].

Результаты и их обсуждение. Для получения комплексных препаратов, включающих микроэлементы, за основу были взяты оксидаты, показавшие активность в 2024 г: оксидаты магелланикум-мха и торфа со степенью разложения (*R*) 5 и 20–25 %, а также два водных гидролизата – мха и торфа – с *R* 5 %. По отработанным в лабораторных условиях режимам из этих образцов получены оксидаты в следующих технологических условиях: температура процесса – 130 °С; продолжительность – 3 ч; расход щелочного агента – 40 % от ОВ сырья, пероксида водорода – 15 %. Водные гидролизаты наработаны при температуре 160 °С и продолжительности гидролиза 3 ч.

В результате наработано пять образцов препаратов, перечень которых, а также выход ОВ из исходного сырья приведены в табл. 1, физико-химическая характеристика опытных образцов препаратов дана в табл. 2.

Таблица 1. Выход препаратов, наработанных методами окисления и гидролиза

Table 1. Yield of preparations produced by oxidation and hydrolysis methods

Номер образца	Препарат	Выход, % от ОВ сырья
1	Оксидат магелланикум-мха в среде гидроксида аммония	35,3
2	Оксидат торфа магелланикум (<i>R</i> 5%) в среде гидроксида аммония	55,6
3	Оксидат торфа магелланикум (<i>R</i> 20–25%) в среде гидроксида аммония	73,2
4	Гидролизат мха магелланикум (водный гидролиз, 160 °С)	17,6
5	Гидролизат торфа магелланикум <i>R</i> 5 %, (водный гидролиз, 160 °С)	20,8

Таблица 2. Физико-химическая характеристика опытных образцов препаратов

Table 2. Physicochemical characteristics of experimental samples of preparations

Номер образца	Цвет	Массовая доля веществ, %			Оптическая плотность, нм	Плотность, г/см ³	pH
		сухих	органических	зола			
1	Желтый	3,30	3,24	0,06	0,41	1,020	8,75
2	Желтовато-коричневый	3,95	3,87	0,18	0,54	1,025	8,62
3	Темно-коричневый	6,60	6,25	0,35	0,65	1,032	8,82
4	Желтовато-коричневый	1,23	1,22	0,01	0,36	1,010	4,11
5	Светло-коричневый	1,58	1,57	0,01	0,38	1,013	3,62

Выход оксидатов получился значительно выше выхода водных гидролизатов и составил для оксидата мха – 35,3 %, оксидата магелланикум-торфа с наименьшей степенью разложения (5 %) – 55,6, со степенью разложения 20–25 % – 73,2 % от органической массы сырья. У водных гидролизатов мха и магелланикум-торфа с R 5 % перешло в раствор 17,6 и 20,8 % массы сырья соответственно.

Препараты, полученные методом окисления сфагнового торфа, содержали 3,87–6,25 % ОВ и 3,95–6,60 сухих веществ, при этом массовая доля и тех и других увеличивалась с ростом степени разложения торфа. Следует отметить незначительное содержание в препаратах зольных соединений, что связано с невысокой зольностью исходных торфов и спецификой применяемых для выделения препаратов реагентов: пероксид водорода разлагался в процессе реакции, а гидроксид аммония удаляли из готовых препаратов испарением после отделения твердых остатков центрифугированием. В оксидате мха почти не содержалось зольных элементов, и практически все сухие вещества были представлены органическими соединениями. При этом их массовая доля была достаточно высокой для растительного сырья и составила 3,30 %. Реакция среды pH препаратов находилась в слабо щелочной области (8,10–8,82).

Водные гидролизаты мха и торфа малой степени разложения (5 %) имели довольно низкое содержание органических (1,22 % для гидролизата мха и 1,57 % для гидролизата торфа) и сухих веществ (1,23 и 1,58 соответственно), минимальное содержание зольных элементов и кислую реакцию среды (4,11 – для препарата из мха и 3,62 – из торфа).

С целью усиления антимикробной активности оксидатов в их состав были введены микроэлементы: цинк, медь и марганец. Для предотвращения осаждения гуминовых веществ в виде солей этих металлов их введение осуществляли в форме комплексонов. В процессе работы использовали следующие хелатирующие агенты: ОЭДФ, динатриевую соль ЭДТА, НТФ. Для проведения исследований были получены водные растворы этих комплексонов в концентрациях от 0,001 до 0,01 % и изучена их фитотоксичность на семенах ячменя (табл. 3).

Таблица 3. Влияние исследуемых комплексонов на энергию прорастания и всхожесть семян ячменя

Table 3. The effect of the studied complexones on the germination energy and viability of barley seeds

Вариант опыта	Концентрация препарата, %	Ячмень	
		Энергия прорастания, %	Всхожесть, %
Контроль	–	75,5	86,0
ЭДТА	0,001	76,1	84,0
	0,003	75,3	87,5
	0,005	75,8	87,0
	0,008	75,0	87,0
	0,010	75,4	86,5
ОЭДФ	0,001	76,5	86,5
	0,003	75,5	85,0
	0,005	75,0	87,0
	0,008	76,0	86,2
	0,010	75,1	86,5
НТФ	0,001	77,5	86,5
	0,003	76,0	87,0
	0,005	75,0	85,5
	0,008	75,5	86,0
	0,010	76,0	86,3

Установлено, что выбранные реагенты в концентрации от 0,001 до 0,01 % не оказывают отрицательного воздействия на всхожесть семян и энергию их прорастания.

Приготовление хелатов водных растворов микроэлементов (марганец, медь, цинк) и их композиций показало, что наиболее эффективным комплексоном является ЭДТА, присутствие которого позволяет получать в щелочной и кислой средах устойчивые системы микроэлементов необходимой концентрации.

Отработан процесс получения комплексонов металлов, а именно условия введения солей металлов в комплексон – динатриевую соль ЭДТА, в том числе концентрации комплексона, концентрации солей металлов и щелочность среды для получения сложного комплексоната, включающего несколько ионов металлов, а также условия введения комплексоната в состав оксидатов.

Для приготовления раствора комплексоната (эдетата) цинка, марганца и меди использовали соли цинка сернокислого семиводного ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$), марганца сернокислого пятиводного ($\text{MnSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$) и меди сернокислой пятиводной ($\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$).

Установлено, что для получения сложного комплексоната цинка, марганца и меди с ЭДТА достаточным количеством комплексона для удерживания этих микроэлементов в растворе является концентрация 2 %, концентрация микроэлементов в комплексных препаратах составляла Zn_{70} , Mn_{50} и Cu_{25} .

Для введения микроэлементов, растворы которых имеют кислую реакцию среды, в растворы препаратов из торфа, имеющих щелочную реакцию среды, необходимо было получить раствор комплексоната со значением pH около 8,0.

Растворяемые соли меди, цинка и марганца в концентрациях, необходимых для проявления бицидных свойств, имеют кислую реакцию среды (pH 4,5–4,7), поэтому для предотвращения выпадения в осадок гуминовой части препаратов, нерастворимой в кислой среде, при получении комплексонатов микроэлементов нужно поддерживать значения pH раствора ЭДТА в щелочной области. Установлено, что для поддержания щелочной среды в растворе комплексоната достаточно использовать 0,8%-й раствор щелочи. На первой стадии в щелочном растворе 0,8%-й концентрации (pH 11,0–11,5) готовили 2,0%-й раствор ЭДТА. После растворения ЭДТА pH раствора составила 10,0–11,0. Затем в растворе ЭДТА последовательно при непрерывном перемешивании растворяли 6,67 г цинка сернокислого семиводного (pH 4,7), 6,57 г марганца сернокислого пятиводного (pH 4,6) и 5,88 г меди сернокислой пятиводной (pH 4,5). Полученный комплексонат – эдетат цинка, марганца и меди (ЭДТА Zn_{70} , Mn_{50} , Cu_{25}) представлял собой комплексную соль ЭДТА – соединение, состоящее из ионов цинка, марганца и меди, каждый из которых был координирован с четырьмя бидентантными молекулами ЭДТА. Реакция среды полученного комплексоната (pH) составила 8,52.

Для приготовления комплексных препаратов, полученный раствор комплексоната – эдетата цинка, марганца, меди $\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_8\text{ZnMnCu}$ (EDTA- $\text{Zn}_{7,0}$ - $\text{Mn}_{5,0}$ - $\text{Cu}_{2,5}$), вносили в оксидаты в соотношении 10 : 1 при непрерывном перемешивании. Содержание микроэлементов в конечных продуктах составляло $\text{Zn}_{7,0}$, $\text{Mn}_{5,0}$, $\text{Cu}_{2,5}$.

В состав оксидата мха и водных гидролизатов, которые не содержат гуминовых веществ, микроэлементы вводили в тех же концентрациях в виде сернокислых солей.

Исследованы физико-химические свойства полученных композиций, включающих оксидаты и гидролизаты мха и торфа и микроэлементы, либо их хелаты (табл. 4).

Таблица 4. Физико-химическая характеристика опытных образцов комплексных препаратов

Table 4. Physicochemical characteristics of experimental samples of complex preparations

Номер образца	Цвет	Массовая доля веществ, %			Оптическая плотность, нм	Плотность г/см ³	pH
		сухих	органических	зола			
1	Желтый	4,00	3,44	0,76	0,41	1,030	8,64
2	Светло-коричневый	4,95	4,07	0,88	0,54	1,045	8,57
3	Темно-коричневый	7,50	6,45	1,05	0,65	1,042	8,67
4	Зеленовато-коричневый	1,93	1,22	0,71	0,36	1,020	3,99
5	Зеленовато-коричневый	2,28	1,57	0,71	0,38	1,025	3,42

В составе данных композиций определены массовая доля сухих веществ, массовая доля ОВ, реакция среды, однородность растворов и растворимость в воде, устойчивость при хранении в течение двух месяцев.

В составе комплексных препаратов, полученных на основе оксидатов торфа, увеличивается доля и органических, и минеральных веществ за счет введения в оксидаты хелатных соединений металлов. Соответственно, возрастают показатели плотности и оптической плотности растворов. Отобранные для дальнейшей работы оксидаты имели реакцию среды, выраженную в единицах pH от 8,31 до 8,67. Гидролизаты, в состав которых микроэлементы вводили в виде солей, имели кислую реакцию среды (pH 3,42 и 3,99).

Установлено, что в указанных концентрациях все оксидаты, включающие микроэлементы в хелатной форме, образовывали устойчивые композиции, не изменявшие свои физико-химические свойства при хранении в течение двух месяцев. Композиции полностью растворимы в водной среде, не содержат осадков и взвесей, однородны по консистенции.

Для испытаний антимикробной активности на чистых культурах фитопатогенов сельскохозяйственных растений в Институт микробиологии НАН Беларуси передано пять образцов комплексных препаратов с микроэлементами – 3 оксидата и 2 гидролизата сфагнового мха и торфа (табл. 5). Для исследований переданы также два контрольных варианта Р1 и Р2 – растворы реагентов, использованных при изготовлении препаратов.

Таблица 5. Образцы препаратов, переданные для испытаний антимикробной активности

Table 5. Samples of drugs submitted for testing of antimicrobial activity

Шифр	Состав образца комплексного препарата
Р1	Контрольный вариант для оксидатов (раствор реагентов)
1-1	Оксидат мха магелланикум, полученный в среде гидроксида аммония при температуре 130 °С+ (Zn _{7,0} –Mn _{5,0} –Cu _{2,5})
2-1	Оксидат торфа магелланикум (R 5 %), полученный в среде гидроксида аммония при температуре 130 °С + (EDTA–Zn _{7,0} –Mn _{5,0} –Cu _{2,5})
3-1	Оксидат торфа магелланикум (R 20–25%), полученный в среде гидроксида аммония при температуре 130 °С + (EDTA–Zn _{7,0} –Mn _{5,0} –Cu _{2,5})
Р2	Контрольный вариант для гидролизатов (раствор реагентов)
4-2	Гидролизат мха магелланикум, полученный водным гидролизом при температуре 160 °С + (Zn _{7,0} –Mn _{5,0} –Cu _{2,5})
5-2	Гидролизат торфа магелланикум (R 5%), полученный водным гидролизом при температуре 160 °С + (Zn _{7,0} –Mn _{5,0} –Cu _{2,5})

В начале микробиологических исследований было установлено, что образцы 1-1, 2-1, 3-1, 5-2, Р2 контаминированы микроорганизмами, образцы 4-2 и Р1 были без признаков контаминации. Для стерилизации образцы были отфильтрованы с использованием стерильных 0,2 мкм шприцевых фильтров (Corning®, 431224) с мембраной из нейлона. После фильтрации был проведен высеив образцов для контроля чистоты. Таким образом все образцы были очищены от посторонних микроорганизмов.

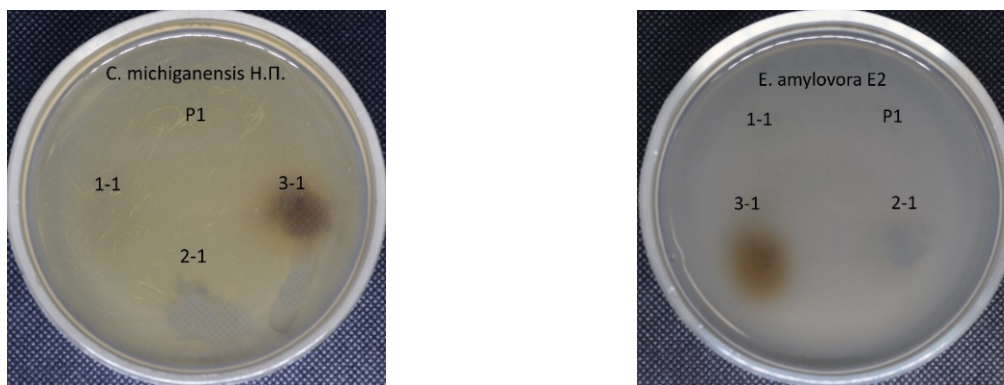
На следующем этапе у полученных образцов определяли активность в отношении ряда бактериальных и грибных фитопатогенов. Результаты данного эксперимента представлены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты определения антимикробных свойств комплексных препаратов

Table 6. Results of determining the antimicrobial properties of complex preparations

Образец	Микроорганизм											
	<i>Pseudomonas corrugata</i> 3'			<i>Pectobacterium carotovorum</i> 25.1			<i>Clavibacter michiganensis</i> subsp. <i>michiganensis</i> Н.П.			<i>Erwinia amylovora</i> E2		
Р1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1-1	-	±	-	-	-	-	-	±	-	-	-	-
2-1	-	±	-	-	-	-	+	+	±	+	±	+
3-1	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	±	-
Р2	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4-2	±	+	+	-	-	-	-	-	-	+	±	+
5-2	+	+	±	-	-	±	-	±	-	+	±	+

Как видно из данных, представленных в табл. 6, из образцов оксидатов (1-1, 2-1, 3-1), образец 2-1 (комплексный препарат на основе магелланикум-торфа 5 % и хелатов микроэлементов) активен в отношении фитопатогенов *C. michiganensis* subsp. *michiganensis* Н.П. и *E. amylovora* E2, а образец 3-1 (комплексный препарат на основе магелланикум-торфа 20–25 % и хелатов микроэлементов) – в отношении *C. michiganensis* subsp. *michiganensis* Н.П. (см. рисунок, а). Для группы 2 (образцы 4-2 и 5-2) показано, что оба препарата (гидролизаты мха и торфа 5 %) данной группы проявляют активность в отношении *E. amylovora* E2 и *P. corrugata* 3' (см. рисунок, б).



а (а)



б (b)

Чашки Петри с результатами тестирования оксидатов: а – группа 1; б – группа 2

Petri dish with the results of oxidant testing: а – group 1; б – group 2

Заключение. С целью усиления антимикробных свойств препаратов, полученных на основе оксидатов и гидролизатов сфагновых мха и торфа, в их состав введены микроэлементы (медь, цинк, марганец). В гуматсодержащие препараты их введение проведено в форме комплексонов этих металлов. В качестве комплексона использована динатриевая соль ЭДТА. В гидролизат и оксидат мха микроэлементы внесены в виде солей.

Отработан процесс получения сложного комплексоната – эдетата цинка, марганца и меди (концентрации комплексона и солей металлов, последовательность, щелочность среды и др.), а также условия его введения в состав оксидатов. Установлено, что для удерживания микроэлементов в растворе достаточной концентрацией комплексона является 2 %, концентрация микроэлементов – Zn_{70} , Mn_{50} и Cu_{25} . Для приготовления комплексных препаратов $EDTA-Zn_{70}-Mn_{50}-Cu_{25}$ вносили в оксидаты в соотношении 1 : 10 при непрерывном перемешивании. Содержание микроэлементов в конечных продуктах составило $Zn_{7,0}$, $Mn_{5,0}$, $Cu_{2,5}$.

С использованием модифицированного метода отсроченного антагонизма осуществлена проверка антимикробной активности пяти образцов (1-1, 2-1, 3-1, 4-2, 5-2), а также двух контрольных образцов (P1, P2) в отношении ряда фитопатогенных микроорганизмов, способных вызывать заболевания сельскохозяйственных культур. Установлено, что комплексный препарат на основе оксидата магелланикум-торфа (R 5 %) и хелатов микроэлементов активен в отношении фитопатогенов *C. michiganensis* subsp. *michiganensis* Н.П. и *Erwinia amylovora* E2, а препарат на основе магелланикум-торфа (R 20–25 %) и хелатов микроэлементов – в отношении *C. michiganensis* subsp. *michiganensis* Н.П. Гидролизаты мха и торфа (R 5 %) проявляют активность в отношении возбудителей *Pseudomonas corrugata* 3' и *Erwinia amylovora* E2.

Показано, что в отношении фитопатогенов *P. syringae* pv. *tomato* DC3000, *P. carotovorum* 25.1, *B. cinerea* БИМ F-551, *F. oxysporum* 381, *A. alternata* БИМ F-568 и *Alternaria* sp. F4 активности не было зафиксировано ни для одного из образцов.

Список использованных источников

1. Антимикробная активность оксидатов и гидролизатов сфагнового торфа и сфагнового мха / Н. А. Жмакова, Н. Л. Макарова, Е. А. Семенчукова, А. А. Муратова // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 146–158.
2. Дятлова, Н. М. Комплексоны и комплексонаты металлов / Н. М. Дятлова, В. Я. Темкина, К. И. Попов. – М. : Химия, 1988. – 544 с.
3. Дятлова, Н. М. Теоретические основы действия комплексонов и их применение в народном хозяйстве и медицине / Н. М. Дятлова // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева. – 1984. – Т. 29, № 3. – С. 358–362.
4. Золотарева, Н. В. Водорастворимые двойные калиевые и аммониевые соли железа (III) и марганца (II) с оксиэтилидендифосфоновой кислотой / Н. В. Золотарева, В. В. Семенов // Журнал общей химии. – 2014. – Т. 84, № 4. – С. 637–641.
5. Аморфные водорастворимые комплексы биометаллов на основе оксиэтилидендифосфоновой кислоты, моноэтанолamina и трис(гидроксиметил)аминометана. Синтез и оценка агрономической эффективности в качестве новых микроудобрений / В. В. Семенов, Н. В. Золотарева, В. И. Петров [и др.] // Журнал общей химии. – 2015. – Т. 85, № 5. – С. 822–830.
6. Водорастворимые комплексы кобальта с 1-гидроксиэтилидендифосфоновой кислотой и 2-аминоэтанолом / В. В. Семенов, Н. В. Золотарева, Н. М. Лазарев [и др.] // Журнал общей химии. – 2017. – Т. 87, № 1. – С. 97–103.
7. О комплексобразующих свойствах оксиэтилидендифосфоновой кислоты в водных растворах / М. И. Кабачник, Р. П. Ластовский, Т. Я. Медведь [и др.] // Доклады АН СССР. – 1967. – Т. 177, № 3. – С. 582–585.
8. Попова, Т. В. Спектрометрическое исследование комплексообразования Fe (II) с оксиэтилидендифосфоновой кислотой в водном растворе / Т. В. Попова, Е. В. Логинова // Химия комплексонов и их применение / Калининский гос. ун-т. – Калинин : КГУ, 1986. – С. 130–135.
9. Состав и антимикробная активность спиртовых и эфирных экстрактов сфагнового торфа и сфагнового мха / Н. А. Жмакова, Н. Л. Макарова, Т. Ф. Овчинникова [и др.] // Природопользование. – 2023. – № 1. – С. 206–215.

References

1. Zhmakova N. A., Makarova N. L., Semenchukova E. A., Muratova A. A. *Antimikrobnaya aktivnost' oksidatov i gidrolizatov sfagnovogo torfa i sfagnovogo mha* [Antimicrobial activity of oxidates and hydrolysates of sphagnum peat and sphagnum moss]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 146–158. (in Russian)
2. Dyatlova N. M., Temkina V. Ya., Popov K. I. *Kompleksony i kompleksonaty metallov* [Complexones and complexonates of metals]. Moscow, Himiya Publ., 1988, 544 p. (in Russian)
3. Dyatlova N. M. *Teoreticheskie osnovy deystviya kompleksonov i ih primeneniye v narodnom hozyaystve i meditsine* [Antimicrobial activity of oxidates and hydrolysates of sphagnum peat and sphagnum moss]. *Jurnal Vsesoyuznogo himicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva = Mendeleyev Journal of the All-Russian Chemical Society*, 1984, vol. 29, no. 3, pp. 358–362. (in Russian)
4. Zolotareva N. V., Semenov V. V. *Vodorastvorimyye dvoynnyie kaliyevyye i ammonievyye soli jeleza (III) i margantsa (II) s oksietilidendifosfonovoy kislotoy* [Water-soluble double potassium and ammonium salts of iron (III) and manganese (II) with oxyethylidenediphosphonic acid]. *Jurnal obschey himii = Journal of General Chemistry*, 2014, vol. 84, no. 4, pp. 637–641. (in Russian)
5. Semenov V. V., Zolotareva N. V., Petrov B. I., e.a. *Amorfnyie vodorastvorimyye kompleksy biometallov na osnove oksietilidendifosfonovoy kisloty, monoetanolamina i tris(gidroksimetil)aminometana. Sintez i otsenka agronomicheskoy effektivnosti v kachestve novykh mikroudobreniy* [Amorphous water-soluble complexes of biometals based on oxyethylidenediphosphonic acid, monoethanolamine and tris(hydroxymethyl)aminomethane. Synthesis and evaluation of agronomic efficiency as new microfertilizers]. *Jurnal obschey himii = Journal of General Chemistry*, 2015, vol. 85, no. 5, pp. 822–830. (in Russian)
6. Semenov V. V., Zolotareva N. V., Lazarev N. M., Varlamova L. D., Geiger E. Yu., Titova V. I., Razov E. N. *Vodorastvorimyye kompleksy kobalta s 1-gidroksietilidendifosfonovoy kislotoy i 2-aminoetanолом* [Water-soluble cobalt complexes with 1-hydroxyethylidene diphosphonic acid and 2-aminoethanol]. *Jurnal obschey himii = Journal of General Chemistry*, 2017, vol. 87, no. 1, pp. 97–103. (in Russian)
7. Kabachnik M. I., Lastovskiy R. P., Medved T. Ya., e.a. *O kompleksobrazuyuschih svoystvakh oksietilidendifosfonovoy kisloty v vodnykh rastvorakh* [On the complexing properties of hydroxyethylidene diphosphonic acid in aqueous solutions]. *Doklady AN SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1967, vol. 177, no. 3, pp. 582–585. (in Russian)
8. Popova T. V., Loginova E. V. *Spektrometricheskoe issledovanie kompleksobrazovaniya Fe (II) s oksietilidendifosfonovoy kislotoy v vodnom rastvore* [Spectrometric study of Fe (II) complexation with oxyethylidenediphosphonic acid in aqueous solution]. *Himiya kompleksonov i ih primeneniye. Sbornik Kalininskiy gos. Universitet. [Proc. of the Kalinin State University "Chemistry of complexones and their application"]*. Kalinin, 1986, pp. 130–135. (in Russian)
9. Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F., Semenchukova E. A., Muratova A. A. *Sostav i antimikrobnaya aktivnost' spirtovykh i efirnykh ekstraktov sfagnovogo torfa i sfagnovogo mha* [Composition and antimicrobial activity of alcoholic and ether extracts of sphagnum peat and sphagnum moss]. *Prirodopolzovanie = Nature Management*, 2023, no. 1, pp. 206–215. (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

Макарова Наталья Леонидовна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Семенчукова Екатерина Александровна – научный сотрудник, Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. акад. В. Ф. Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь). E-mail: eka2105@mail.ru

Муратова Анна Алексеевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. акад. В. Ф. Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь). E-mail: anya.muratova.93@mail.ru

Information about the authors

Nadezhda A. Zhmakova – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhmakova@mail.ru

Natalya L. Makarova – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skariny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Katsiaryna A. Semenchukova – Researcher, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevicha Str., 220084, Minsk, Belarus). E-mail: eka2105@mail.ru

Anna A. Muratova – Ph. D. (Biological), Senior Researcher, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevicha Str., 220084, Minsk, Belarus). E-mail: anya.muratova.93@mail.ru

УДК 662.641.047

Поступила в редакцию 30.11.2025

Received 30.11.2025

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СУШКИ ТОРФЯНЫХ ГРАНУЛ

М. Г. Калантаров¹, А. И. Сорокин¹, Н. Н. Шилович², Ю. Г. Янута¹

¹Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

²Белорусский государственный экономический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе проведен анализ основных методов сушки торфяных гранул в нагретом барабане: с вытеснением влаги наружу непрогретым воздухом, с вытеснением влаги наружу и частичной рециркуляцией отработанного сушильного агента, с вытеснением влаги наружу непрогретым воздухом с рекуперацией тепла из отработанного влажного агента. Рассмотрен также процесс сушки торфяных гранул в барабане интенсивным электромагнитным полем сверхвысокой частоты (СВЧ) с вытеснением влаги наружу непрогретым воздухом. Дана оценка основных параметров процесса конвективной сушки с целью выбора оптимальных условий его протекания, позволяющих сократить расход потребляемой энергии для получения конечного продукта. Для рассмотренных методов сушки торфяных гранул приводятся аналитические зависимости оценки оптимальных параметров сушильного агента при равновесии между высушиваемым материалом и сушильной средой.

Ключевые слова: барабан; влагосодержание; влажность; давление; гранула; температура; теплоемкость; теплосодержание; энтальпия.

Для цитирования. Калантаров М. Г., Сорокин А. И., Шилович Н. Н., Янута Ю. Г. Анализ методов сушки торфяных гранул // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 156–171.

ANALYSIS OF PEAT GRANULES DRYING METHODS

M. G. Kalantarov¹, A. I. Sorokin¹, N. N. Shilovich², Yu. G. Yanuta¹

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

²Belarusian State Economic University, Minsk, Belarus

Abstract. This paper analyzes the main methods of drying peat pellets in a heated drum: with moisture displacement by unheated air, with moisture displacement and partial recirculation of the spent drying agent, and with moisture displacement by unheated air with heat recovery from the spent wet agent. The process of drying peat pellets in a drum using an intense ultra-high frequency (UHF) electromagnetic field with moisture displacement by unheated air is also considered. The main parameters of the convective drying process are assessed with the aim of selecting optimal conditions for its occurrence, allowing for a reduction in energy consumption for obtaining the final product. For the considered methods of drying peat pellets, analytical dependencies are presented for assessing the optimal parameters of the drying agent at equilibrium between the dried material and the drying medium.

Keywords: drum; moisture content; humidity; pressure; granule; temperature; heat capacity; heat content; enthalpy.

For citation. Kalantarov M. G., Sorokin A. I., Shilovich N. N., Yanuta Yu. G. Analysis of peat granules drying methods. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 156–171.

Введение. Процесс конвективной сушки неизбежно сопровождается неполным использованием энергии теплоносителя, что связано с условиями гигротермического равновесия между высушиваемым материалом и сушильной средой. Основной и общий недостаток существующих конструкций аэродинамических сушилок – сравнительно невысокая интенсивность тепло- и массообменных процессов. Практика показывает [1], что большинство сушилок являются достаточно энергоемкими, не обеспечивая нужного качества сушки. Утилизация и вторичное использование тепла отработанного сушильного агента до сих пор остаются проблематичными, так как существуют трудности, связанные со сравнительно невысоким потенциалом газового теплоносителя на выходе из сушилки. Анализ модельной задачи для каждого способа температурной сушки сыпучих материалов, на примере торфяных удобрений, позволяет обосновать целесообразность каждого способа сушки и определить оптимальный процесс сушки для создания наиболее экономичных конструкций сушильных установок. В имеющейся на настоящее время научно-технической литературе по сушке сыпучих материалов такая модельная задача не рассматривалась и выводы об экономической целесообразности использования рассмотренных в работе способов сушки не приведены. Обзор существующей научно-технической литературы

дает лишь практические рекомендации по улучшению отдельных технических характеристик сушильных установок с целью интенсификации процесса сушки различных материалов, но не позволяет сделать выводы об экономической эффективности использования таких сушильных установок, равно как и самих методов сушки.

В данной работе предполагалось рассмотреть модельные задачи необходимых затрат энергии для способов сушки на предмет их экономической целесообразности, таких как:

- 1) сушка в нагретом барабане с вытеснением влаги наружу непрогретым воздухом (сушильным агентом заданной влажности);
- 2) сушка в барабане нагретым воздухом (сушильным агентом заданной влажности) с выходом отработанного сушильного агента в атмосферу;
- 3) сушка в барабане интенсивным электромагнитным полем сверхвысокой частоты (СВЧ) с вытеснением влаги наружу ненагретым воздухом;
- 4) сушка методом нагрева инфракрасным излучением.

В процессе анализа полученных результатов ставилась цель: дать оценку соотношения энергетических затрат для указанных выше способов сушки в зависимости от режима выделения влаги из материала при изменении условий процесса сушки.

Методы исследования. При сушке нагретым воздухом с определенными параметрами нельзя удалить всю влагу из материала. Такой процесс может быть доведен только до равновесной, соответствующей данным термодинамическим параметрам воздуха влажности материала. В сушильной технике вводится понятие удаляемого влагосодержания W_y . Это влагосодержание материала W за вычетом его равновесного влагосодержания W_p : $W_y = W - W_p$.

Из изотерм десорбции следует, что если влагосодержание материала больше максимального гигроскопического $W_{г. макс}$, то давление пара жидкости материала p_m равно давлению насыщенного пара свободной жидкости при температуре материала p_n и не зависит от его влагосодержания, т. е. при $W > W_{г. макс}$: $p_m = p_n = \text{const}$. Сам процесс сушки рассматривается как квазистатический, т. е. средние значения влагосодержания и температуры внутри материала равны их локальным значениям, в том числе и их значениям на поверхности материала.

Известно, что водяной пар в воздухе может находиться либо в перегретом, либо в насыщенном состоянии. Смесь, состоящая из сухого воздуха и перегретого водяного пара, называется ненасыщенным влажным воздухом, или сушильным агентом. Такой сушильный агент поглощает влагу и используется в сушильных установках. Смесь, состоящая из сухого воздуха и насыщенного водяного пара, называется насыщенным влажным воздухом, и дальнейшее увеличение в нем влаги приведет к конденсации водяного пара и образованию жидкой фазы. Для большинства технических задач влажный воздух с хорошей точностью можно описать уравнением состояния идеального газа. При расчете сушильных установок основными параметрами влажного воздуха являются относительная влажность ϕ , влагосодержание X , температура T и энтальпия I .

Согласно первому закону термодинамики для процессов, в которых давление p постоянно бесконечно малое количество тепла dQ можно представить в виде полного дифференциала:

$$dQ = d(U + pV) = dI, \quad (1)$$

где $I = U + pV$ – тепловая функция системы, или энтальпия.

Под энтальпией понимается количество тепла, подведенное к влажному воздуху при постоянном давлении и нагревании его от 0°C до некоторой определенной температуры $T > 0^\circ\text{C}$. Энтальпия, подобно внутренней энергии U , определяется из термодинамических соотношений также с точностью до константы I_0 . Изменение энтальпии в процессах, происходящих при постоянном давлении, равно количеству тепла, полученному системой. Если система теплоизолирована, т. е. количества тепла в ней не изменяется: $dQ = 0$, то ее энтальпия при таком изобарно-адиабатическом процессе неизменна: $I = \text{const}$.

Энтальпия влажного воздуха состоит из энергии, используемой для нагревания сухого воздуха и воды, теплоты испарения воды и энергии, затраченной на нагревание водяного пара. Для расчета энтальпии влажного воздуха при начальных условиях $273,15\text{ K}$ (0°C) и давлении насыщенных паров $p_0 = 610\text{ Па}$ используют следующее выражение:

$$I = (C_v + C_n X)T + r_0 X = (1010 + 1970X)T + 2\,493\,000X, \quad (2)$$

где C_v и C_n – теплоемкости сухого воздуха и водяного пара соответственно; r_0 – удельная теплота парообразования при 0°C ; X – влагосодержание воздуха.

Влагосодержанием воздуха X является функцией только парциального давления и определяется выражением

$$X = 0,622P_n / (B - P_n) = 0,622\varphi P_n / (B - \varphi P_n). \quad (3)$$

При взаимодействии газа и влажного материала, содержащего свободную жидкость, процесс теплообмена сопровождается процессом переноса влаги, поэтому изобарно-адиабатические условия системы, выраженные уравнением (1), должны быть дополнены энтальпией переносимой массы влаги:

$$dQ = d(U + pV) - I_{\text{ж}} dW = dI - C_{\text{ж}} T_{\text{ж}} dX = 0. \quad (4)$$

Здесь $I_{\text{ж}} = C_{\text{ж}} T_{\text{ж}} = C_{\text{ж}} \Theta$ – удельная энтальпия жидкости; $dW = dX$ – удельное изменение массы влаги, т. е. изменение массы влаги на единицу сухой массы влажного газа.

После интегрирования выражения (4) в пределах некоторых состояний 1 и 2 получаем соотношение

$$(I_2 - I_1) / (X_2 - X_1) = \Delta I / \Delta X = C_{\text{ж}} \Theta. \quad (5)$$

Выражение (5) является уравнением прямой линии, которая характеризует изменение состояния влажного газа, контактирующего со свободной жидкостью влажного материала, в условиях изобарно-адиабатического процесса при конвективном подводе тепла.

Для действительного процесса уравнение (5) следует дополнить поступлениями или расходами тепла, имеющимися в реальной сушилке:

$$\Delta I / \Delta X = (C_{\text{ж}} \Theta + q_{\text{дп}}) - (q_{\text{м}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{пт}}) = \Delta q, \quad (6)$$

где $q_{\text{дп}}$ – удельное добавочное тепло, вводимое в сушилку; $q_{\text{м}}$ – удельные затраты тепла на нагрев материала до температуры адиабатического испарения влаги; $q_{\text{тр}}$ – тепло, затрачиваемое на нагревание транспортных средств или агентов; $q_{\text{пт}}$ – удельные потери тепла; Δq – сумма дополнительно сообщенного ($C_{\text{ж}} \Theta + q_{\text{дп}}$) и расходуемого ($q_{\text{м}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{пт}}$) тепла.

В зависимости от соотношения количеств подводимого и расходуемого тепла процесс сушки может протекать с увеличением ($\Delta q > 0$) или уменьшением ($\Delta q < 0$) энтальпии сушильного агента; $\Delta q = 0$ характеризует процесс теоретической сушки (рис. 1). Соотношение (6) позволяет найти точку C' или C'' , показывающую отклонение реального процесса от теоретического процесса, т. е. от процесса при постоянной энтальпии (изоэнтальпии) (точка C).

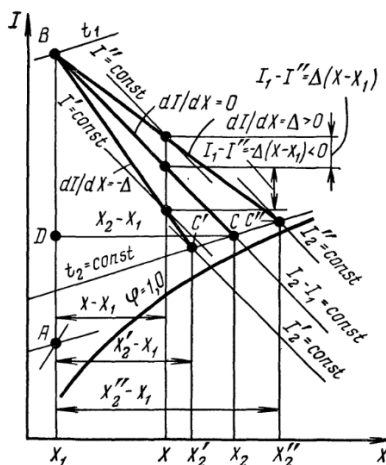


Рис 1. Расчет действительного процесса сушки на диаграмме I - X

Fig. 1. Calculation of the actual drying process on the diagram I - X

Общая схема процесса сушки в конвективной сушильной установке представлена на рис. 2. Наружный воздух с параметрами T_0 (температура), φ_0 (влажность), w_0 (влагосодержание) и I_0 (энтальпия) входит в сушильную камеру, в которой находится материал с параметрами T_0 , $\varphi_{\text{пр}}$, W_1 . В процессе сушки параметры воздуха изменяются и достигают значений T_1 , φ_1 , w_1 и I_1 . Состояние материала перед сушилкой характеризуется параметрами W_1 (начальное влагосодержание) и T_0 (начальная температура), а после сушилки параметрами W_2 (конечное влагосодержание) и T_1 (конечная температура).

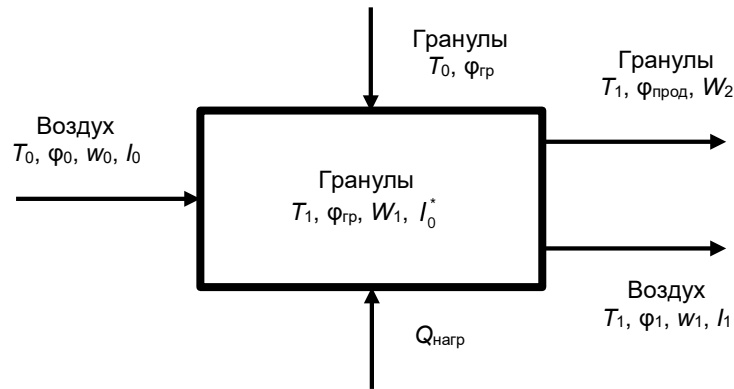


Рис. 2. Общая схема процесса сушки

Fig. 2. General diagram of the drying process

К числу основных потоков для уравнения материального баланса относят следующие: количество удаляемой в единицу времени влаги U и расход воздуха L . Согласно закону сохранения вещества масса влажного материала G_1 , входящего в сушильную камеру в единицу времени, равна массе высушенного материала G_2 , выходящего из камеры в единицу времени вместе с массой удаленной из него влаги U (материальный баланс по влажному материалу):

$$G_1 = G_2 + U. \quad (7)$$

Так как в процессе сушки масса сухого вещества остается постоянной, имеют место уравнения

$$G_1 = G_c / (1 - W_1 / 100) \text{ и } G_2 = G_c / (1 - W_2 / 100), \quad (8)$$

где G_c – масса сухого вещества; W_1 и W_2 – начальное и конечное влагосодержание соответственно, отнесенное к общей массе материала, %.

Уравнение баланса влаги для сушильной камеры при установившемся процессе сушки выражает равенство массы влаги, поступившей в камеру с материалом и воздухом, и влаги, уходящей из камеры с материалом и воздухом (материальный баланс по сушильному агенту):

$$G_1 W_1 / 100 + L w_0 / 1000 = G_2 W_2 / 100 + L w_1 / 1000, \quad (9)$$

где $G_1 W_1 / 100$ – масса влаги, поступившей с материалом в сушильную камеру; $L w_0 / 1000$ – масса влаги, поступившей с воздухом; $G_2 W_2 / 100$ – масса влаги, уходящей с материалом; $L w_1 / 1000$ – масса влаги, удаленной с воздухом; w – влагосодержание воздуха, выраженное в граммах на 1 кг сухого воздуха. Количество испаренной влаги $U = G_1 W_1 / 100 - G_2 W_2 / 100 = L(w_1 - w_0) / 1000$.

Следовательно, масса сухого воздуха $L = U \cdot 1000 / (w_1 - w_0)$.

Вместо величины w , имеющей размерность г/кг, также используют величину X , имеющую размерность кг/кг, т. е. $w = 1000X$. Тогда основное уравнение для определения расхода воздуха L в сушильной установке примет следующий вид:

$$L = U / (X_1 - X_0). \quad (10)$$

Расход тепла на сушку находят из теплового баланса для сушильного агента:

$$Q_{\text{нагр}} = L(I_1 - I_0) + Q_{G_2} - Q_{G_1}, \quad (11)$$

где $Q_{\text{нагр}}$ – теплота, подводимая непосредственно в сушильную камеру; I_0 и I_1 – энтальпии воздуха (сушильного агента) на входе и выходе сушильной камеры (барабана) соответственно, кДж/кг; Q_{G_2} – количество тепла, выходящее из камеры вместе с высушенным материалом требуемой влажности; Q_{G_1} – количество тепла, поступившее в камеру с влажным материалом гранул.

Основные тепловые потоки в сушильной камере (барабане):

– количество тепла, поступившее в сушильную камеру: Ll_0 – тепло, поступившее в камеру с воздухом из окружающей среды; $Q_{\text{нагр}}$ – дополнительное тепло, подводимое непосредственно в сушильную камеру; Q_{G_1} – количество тепла, поступившее в камеру с влажным материалом;

– количество тепла, выходящее из камеры: Ll_1 – количество тепла, выходящее из сушильной камеры с влажным воздухом; $G_2 C(T_1 - T_0)$ – количество тепла, выходящее из сушильной камеры с высушенным материалом. Сюда же можно отнести: $Q_{\text{окр}}$ – потери тепла в окружающую среду; $Q_{\text{тр}}$ – транспортные потери тепла. Эти потери для модельной задачи составят не более 10 % от тепловых затрат на сушку материала в камере (барабане).

Здесь G_2 – масса высушенного материала влажности φ_2 , кг; $C = C_c(1 - \varphi_2) + C_{\text{ж}}\varphi_2$ – теплоемкость высушенного материала влажности φ_2 , Дж/(кг·К); C_c и $C_{\text{ж}}$ – теплоемкости сухого материала (торфяных) гранул и воды соответственно, Дж/(кг·К).

Результаты и их обсуждение.

1. Метод сушки в нагретом барабане с вытеснением влаги наружу ненагретым воздухом (сушильным агентом заданной влажности) приведен на схеме сушки (рис. 3).

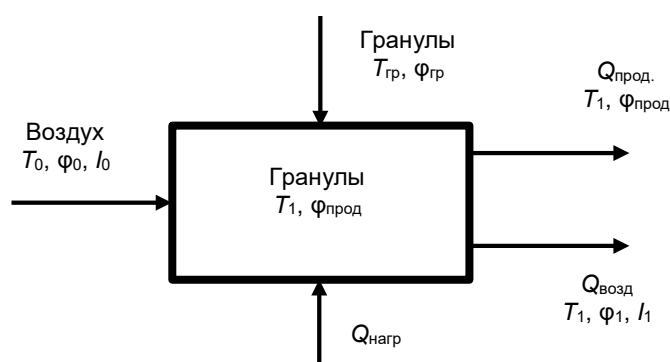


Рис. 3. Схема сушки в нагретом барабане с вытеснением влаги наружу ненагретым воздухом

Fig. 3. A drying scheme in a heated drum with moisture being forced out by unheated air

Граничные условия модельной задачи для процесса сушки представлены следующим образом:

Вход:

Исходный сушильный агент: $L, T_0, \varphi_0, w_0, l_0$.

Гранулы: $G_1, T_{\text{гр}} = T_0, \varphi_{\text{гр}} = 0,5, W_1 = G_c = 0,5$ кг.

Выход:

Отработанный агент: $L, T_1, \varphi_1, w_1, l_1$.

Гранулы: $G_2, T_{\text{прод}} = T_1, \varphi_{\text{прод}} = 0,1, W_2 = G_c / 9$.

Требуется найти общий расход тепла $Q_{\text{общ}}$, а также расход тепла, затраченный на нагрев $Q_{\text{нагр}}$ воздуха $Q_{\text{возд}}$ и продукта $Q_{\text{прод}}$.

Уравнение теплового баланса для сушильной камеры:

$$Q_{\text{нагр}} = L(l_1 - l_0) + G_2 (C_c(1 - \varphi_{\text{прод}}) + C_{\text{ж}}\varphi_{\text{прод}})(T_1 - T_0), \quad (12)$$

где L – массовый расход сушильного агента (сухого воздуха), кг; l_0 и l_1 – энтальпии исходного и отработанного агента (воздуха) соответственно, кДж/кг; G_1 – масса влажного материала, поступившего в сушильную камеру, кг; G_2 – масса высушенного материала, выходящего из камеры, кг; G_c – масса сухого вещества гранулы, кг; C_c и $C_{\text{ж}}$ – теплоемкости сухого торфа и воды соответственно, Дж/(кг·К); $\varphi_{\text{гр}}$ – начальная влажность материала гранулы, т. е. влагосодержание гранулы, отнесенное к общей массе материала гранулы и выраженное в долях; $\varphi_{\text{прод}}$ – конечная влажность материала гранулы, выраженная в долях. Здесь, соответственно:

$$Q_{\text{возд}} = L(l_1 - l_0) \text{ и } Q_{\text{прод}} = G_2 (C_c(1 - \varphi_{\text{прод}}) + C_{\text{ж}}\varphi_{\text{прод}})(T_1 - T_0). \quad (13)$$

Сушка при заданном количестве сушильного агента в сушильной камере (барабане) продолжается до тех пор, пока давление водяного пара в материале будет превышать парциальное давление водяного пара в сушильном агенте, т. е. $p_{\text{п}} < p_{\text{м}}$ или $p_{\text{п}}/p_{\text{н}} < p_{\text{м}}/p_{\text{н}}$ (где $p_{\text{п}}$ и $p_{\text{н}}$ – парциальное давление водяного пара и давление насыщенного пара для сушильного агента; $p_{\text{м}}$ – давление водяного пара в материале). Процесс сушки протекает пока $\varphi_{\text{агента}} = \varphi_0 < \varphi_{\text{материала}}$.

Количество тепла, затрачиваемое на процесс сушки в нагретом барабане при вытеснении влаги наружу непрогретым воздухом, поступающим в барабан из окружающей среды,

$$Q_{\text{нагр}} = 8/9 \cdot G_c (I_1 - I_0) / (X_1 - X_0) + G_2 (C_c (1 - \varphi_{\text{прод}}) + C_{\text{ж}} \varphi_{\text{прод}}) (T_1 - T_0). \quad (14)$$

Для сушильного агента, поступающего в камеру при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ (293 K) с присутствующим в нем водяным паром, работа в ходе его расширения, затраченная на вытеснение отработанного агента из барабана, равна: $A = P_{\text{атм}} \Delta V = P_{\text{атм}} (V_1 - V_0)$, где $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, равное 101 325 Па, а V_1 и V_0 – объемы, занимаемые сушильным агентом при температуре нагрева T_1 и температуре окружающей среды (начальной температуре) $T_0 = 20^\circ\text{C}$ (293 K) соответственно.

Масса сушильного агента не изменяется при его изобарическом расширении. Тогда

$$A = P_{\text{атм}} \Delta V = P_{\text{атм}} V_0 (T_1 / T_0 - 1). \quad (15)$$

Количество тепла, расходуемое на механическую работу расширения атмосферного воздуха при вытеснении отработанного влажного агента из барабана, составит:

$$Q_{\text{расш}} = P_{\text{атм}} \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) V_0 = P_{\text{атм}} \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) \mu V_{\text{моль}}, \quad (16)$$

где $\mu = L_{\text{возд}} / M_{\text{атм}}$ – количество молей атмосферного воздуха при известном его расходе $L_{\text{возд}}$ на сушку 1 кг материала ($M_{\text{атм}}$ – молярная масса атмосферного воздуха при $\varphi_0 = 0,4$).

Общие затраты тепла для метода сушки в нагретом барабане с вытеснением влаги наружу ненагретым воздухом на сушку 1 кг материала по схеме на рис. 3 представлены в табл. 1.

2. Метод сушки в барабане нагретым воздухом (сушильным агентом заданной влажности) с выходом отработанного агента в атмосферу приведен на схеме сушки (рис. 4).

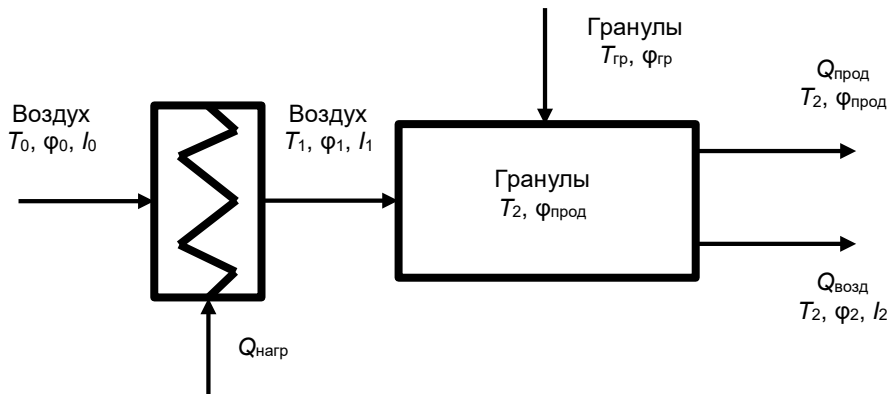


Рис. 4. Схема сушки в барабане нагретым воздухом (сушильным агентом заданной влажности) с выходом отработанного сушильного агента в атмосферу

Fig. 4. A drying scheme in a drum with heated air (drying agent of a given humidity) with the release of spent drying agent into the atmosphere

Граничные условия модельной задачи для процесса сушки представлены следующим образом:

Вход:

Исходный сушильный агент: $L, T_0, \varphi_0, w_0, I_0$.

Гранулы: $G_1, T_{\text{гр}} = T_0, \varphi_{\text{гр}} = 0,5, W_1 = G_c = 0,5 \text{ кг}$.

Выход:

Отработанный агент: $L, T_2, \varphi_2, w_2, I_2$.

Гранулы: $G_2, T_{\text{прод}} = T_2, \varphi_{\text{прод}} = 0,1, W_2 = G_c / 9$.

Требуется найти общий расход тепла $Q_{\text{общ}}$, а также расход тепла, затраченный на нагрев $Q_{\text{нагр}}$: воздуха $Q_{\text{возд}}$ и продукта $Q_{\text{прод}}$.

Система уравнений теплового баланса:

– для нагревателя:

$$Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{возд}} + Q_{\text{расш}} = L (I_1 - I_0) + P_{\text{атм}} \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) \mu V_{\text{моль}}; \quad (17)$$

– для сушильной камеры:

$$L(I_1 - I_2) = G_2(C_c(1 - \varphi_{\text{прод}}) + C_{\text{ж}}\varphi_{\text{прод}})(T_2 - T_0), \quad (18)$$

где L – массовый расход сушильного агента (сухого воздуха), кг; I_0 , I_1 и I_2 – энтальпии исходного, нагретого и отработанного агента (воздуха) соответственно, кДж/кг; G_1 – масса влажного материала, поступившего в сушильную камеру, кг; G_2 – масса высушенного материала, выходящего из камеры, кг; G_c – масса сухого вещества гранулы, кг; C_c и $C_{\text{ж}}$ – теплоемкости сухого торфа и воды соответственно, Дж/(кг·К); $\varphi_{\text{гр}}$ – начальная влажность материала гранулы, т. е. влагосодержание гранулы, отнесенное к общей массе материала гранулы и выраженное в долях; $\varphi_{\text{прод}}$ – конечная влажность материала гранулы, выраженная в долях. Здесь, соответственно:

$Q_{\text{возд}} = L(I_1 - I_0)$ – количество тепла, затраченное только на нагрев воздуха;

$Q_{\text{расш}} = P_{\text{атм}} \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) \mu V_{\text{моль}}$ – количество тепла, затраченное на механическую работу расширения

атмосферного воздуха в результате его нагрева (μ – количество молей атмосферного воздуха при известном его расходе на сушку 1 кг материала). К общим затратам энергии добавляются также транс-

портные расходы на движение воздуха со скоростью V : $\frac{L_{\text{возд}} V^2}{2}$.

Следует обратить внимание на следующую особенность процесса сушки данным методом. В модельной задаче сушильная камера рассматривается как теплоизолированный от внешней среды некоторый объем пространства. В процессе сушки внутри этого объема происходит теплообмен сушильного агента с высушиваемым материалом. Внутренняя энергия системы сушильный агент – высушиваемый материал не меняется. В результате удаления влаги из материала определенное количество тепла сушильного агента уходит на испарение воды, т. е. на переход воды из жидкого в парообразное состояние. При этом энтальпия сушильного агента уменьшается на величину парообразования. Образовавшийся при этом пар переходит в сушильный агент, повышая его влажность и, соответственно, его энтальпию. В итоге при удалении влаги из материала методом обдувания нагретым воздухом температура системы сушильный агент – высушиваемый материал несколько уменьшается до некоторого значения T_2 в отличие от метода сушки в барабане, нагретом до заданной постоянной температуры $T_1 > T_2$.

Таким образом, даже в случае идеального контакта сушильного агента с материалом процесс удаления влаги из материала сопровождается понижением температуры сушки до некоторого значения T_2 . Соответственно, даже при идеальном теплообмене сушильного агента и материала, т. е. когда тепло передается материалу от всего объема сушильного агента, поступившего в камеру, а не только от небольшой его части в непосредственной близости от высушиваемого материала, количество влаги, удаленное из материала, будет соответствовать количеству влаги, удаленной из материала по методу сушки в барабане, нагретом до температуры $T_2 < T_1$. Это, в свою очередь, потребует увеличения расхода сушильного агента и, соответственно, не только транспортных затрат, но и затрат тепла на его нагрев.

Следует также отметить, что количество влаги, удаляемой из материала, обратно пропорционально температуре сушки методом обдува материала нагретым воздухом и по своей сути дальнейшее удаление влаги из материала ограничено величиной этой удаляемой влаги за счет дополнительного повышения влажности сушильного агента в результате понижения его температуры.

Единственный выход повышения эффективности данного способа сушки – повысить температуру нагрева поступающего в барабан сушильного агента. Однако повышение температуры сушильного агента ограничено величиной термической устойчивости высушиваемого материала.

Таким образом, даже без учета повышения транспортных расходов, затраченных на движение воздуха со скоростью V , и при идеальном теплообмене сушильного агента и высушиваемого материала, количество тепла, требуемое только на нагрев сушильного агента нагретым воздухом, превышает количество тепла, требуемое при сушке в нагретом до постоянной температуры барабане.

В случае увеличения скорости поступления сушильного агента в камеру лишь некоторая его часть будет задействована в теплообмене с высушиваемым материалом. Соответственно, чем больше скорость движения нагретого воздуха в камере, тем больше его массовый расход и, значит, тем меньшая его часть от всего поступившего в камеру объема нагретого воздуха будет участвовать в теплообмене с высушиваемым материалом.

Таким образом, для характеристики процесса теплообмена сушильного агента и материала логично ввести параметр $\varepsilon \leq 1$, характеризующий некоторую часть от всего объема сушильного агента в барабане, которая успеет вступить в теплообмен с высушиваемым материалом.

Параметр ε обратно пропорционален скорости движения нагретого воздуха в барабане (камере) и измеряет скорость его движения V , при сушке нагретым воздухом в барабане, в скоростях его вытеснения $V_{\text{выт}}$, при сушке в нагретом барабане, вытесняя отработанный агент, нагретый в барабане до температуры T , ненагретым воздухом, поступающим в барабан со скоростью вытеснения $V_{\text{выт}}$, т. е. справедливо соотношение $\varepsilon = V_{\text{выт}} / V$. Если при сушке материала нагретым воздухом скорость движения воздуха в барабане равна скорости его вытеснения при сушке в нагретом барабане, то $\varepsilon = 1$ и тогда процесс сушки материала нагретым воздухом происходит при идеальном теплообмене сушильного агента и материала, т. е. когда тепло передается материалу от всего объема сушильного агента поступившего в камеру, а не только от небольшой его части в непосредственной близости от высушиваемого материала. Как было указано выше, даже при таком идеальном режиме процесс удаления влаги из материала сопровождается понижением температуры сушки до некоторого значения T_2 . Это понижение температуры уменьшает способность сушильного агента отбирать влагу из материала и, в свою очередь, требует увеличения его расхода на сушку, что ведет к увеличению, не только транспортных затрат на его перемещение со скоростью V , но и затрат тепла, на его нагрев. Соответственно, увеличение скорости движения нагретого воздуха в барабане ведет к уменьшению времени его взаимодействия с высушиваемым материалом, а, значит, к уменьшению относительного объема сушильного агента, который вступил в теплообмен с высушиваемым материалом, т. е. к уменьшению параметра ε . Это еще более понижает температуру той части сушильного агента в камере, которая вступила в теплообмен с высушиваемым материалом, что означает понижение фактической температуры сушки нагретым воздухом в барабане, поскольку уменьшает способность сушильного агента отбирать влагу из материала и, в свою очередь, требует увеличения его расхода на сушку. Количество тепла, требуемое на удаление влаги из 1 кг материала гранул нагретым воздухом, поступающим в барабан из нагревателя, определяется из уравнения:

$$Q_{\text{нагр}} = 8/9 \cdot G_c (I_2 - I_0) / (X_2 - X_0) + G_2 (C_c (1 - \varphi_{\text{прод}}) + C_{\text{ж}} \varphi_{\text{прод}}) (T_2 - T_0). \quad (19)$$

Необходимый расход сушильного агента на сушку 1 кг материала составит $8/9 \cdot G_c (X_2 - X_0)$ кг, и, соответственно, расход тепла на его нагрев по схеме сушки на рис. 4 равен:

$$Q_{\text{нагр}} = 8/9 \cdot G_c (I_1 - I_0) / (X_2 - X_0) + G_2 (C_c (1 - \varphi_{\text{прод}}) + C_{\text{ж}} \varphi_{\text{прод}}) (T_2 - T_0). \quad (20)$$

Общие затраты тепла для метода сушки в барабане нагретым воздухом (сушильным агентом заданной влажности) с выходом отработанного агента в атмосферу на сушку 1 кг материала по схеме на рис. 4 представлены в табл. 1 для следующих скоростей V движения воздуха в барабане: $V = V_{\text{выт}}$, $V = 10V_{\text{выт}}$, $V = 15V_{\text{выт}}$, $V = 20V_{\text{выт}}$, где $V_{\text{выт}} \approx 0,05-0,15$ м/с.

Таблица 1. Результаты общих тепловых затрат на сушку 1 кг материала по схеме на рис. 3 для скорости $V = V_{\text{выт}}$ и на рис. 4 для скоростей $V = V_{\text{выт}}$, $V = 10V_{\text{выт}}$, $V = 15V_{\text{выт}}$, $V = 20V_{\text{выт}}$

Table 1. Results of total heat consumption for drying 1 kg of material on the scheme in fig. 3 for the speed $V = V_{\text{displ}}$ and in fig. 4 for the speeds $V = V_{\text{displ}}$, $V = 10V_{\text{displ}}$, $V = 15V_{\text{displ}}$, $V = 20V_{\text{displ}}$

$T, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{общ}}, \text{Дж (рис. 3)}$ $V = V_{\text{выт}}$	$Q_{\text{общ}}, \text{Дж (рис. 4)}$			
		$V = V_{\text{выт}}$	$V = 10V_{\text{выт}}$	$V = 15V_{\text{выт}}$	$V = 20V_{\text{выт}}$
50	11 002 274	11 735 920	117 030 389	183 197 502	234 030 959
60	4 961 662	5 156 006	51 121 907	81 767 132	102 197 769
70	3 456 330	3 601 149	35 466 055	56 709 968	72 838 390
80	2 743 279	2 888 908	28 237 476	46 489 284	60 633 828
90	2 325 430	2 491 004	25 357 140	41 002 979	54 057 310
100	2 055 119	2 255 053	23 851 016	40 234 528	53 384 624
110	1 870 721	2 121 576	23 624 294	40 406 828	54 512 909
120	1 740 994	2 060 989	24 688 646	42 876 201	58 426 477
130	1 648 048	2 063 605	26 435 047	46 583 302	66 922 686
140	1 580 789	2 135 485	30 093 711	56 060 574	80 031 454
150	1 531 957	2 300 904	36 735 156	69 024 503	101 316 120

Представление об общих затратах, согласно значениям, приведенным в табл. 1, наглядно иллюстрирует рис. 5. На нем величина ε характеризует скорость V движения воздуха в барабане, т. е. показывает приведенный объем сушильного агента в камере, который был использован на испарение количества влаги из материала за время, в течение которого сушильный агент двигался в барабане со скоростью V .

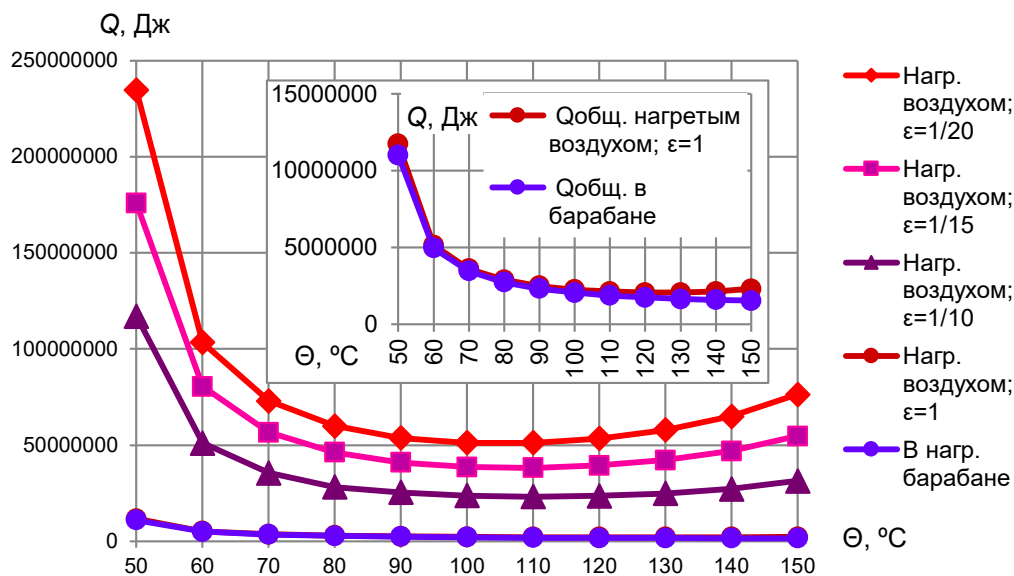


Рис. 5. Общие затраты тепла для метода сушки 1 кг материала в барабане нагретым воздухом с выходом последнего в атмосферу для скоростей V движения воздуха в барабане: $V = V_{\text{выт}}, V = 10V_{\text{выт}}, V = 15V_{\text{выт}}, V = 20V_{\text{выт}}$, где $V_{\text{выт}} \approx 0,1$ м/с

Fig. 5. Total heat consumption for the method of drying 1 kg of material in a drum with heated air with the release of the latter into the atmosphere for air movement speeds of V in the drum: $V = V_{\text{displ}}, V = 10V_{\text{displ}}, V = 15V_{\text{displ}}, V = 20V_{\text{displ}}$, where $V_{\text{displ}} \approx 0,1$ m/s

На рис. 6 представлен график отношений тепловых затрат на нагрев сушильного агента в методе сушки нагретым воздухом Q_2 и сушке в нагретом барабане Q_1 . Величина ε характеризует приведенный размер активной части объема сушильного агента поступившего в камеру, т. е. относительный размер той части объема сушильного агента в камере, которая участвует в теплообмене с высушиваемым материалом.

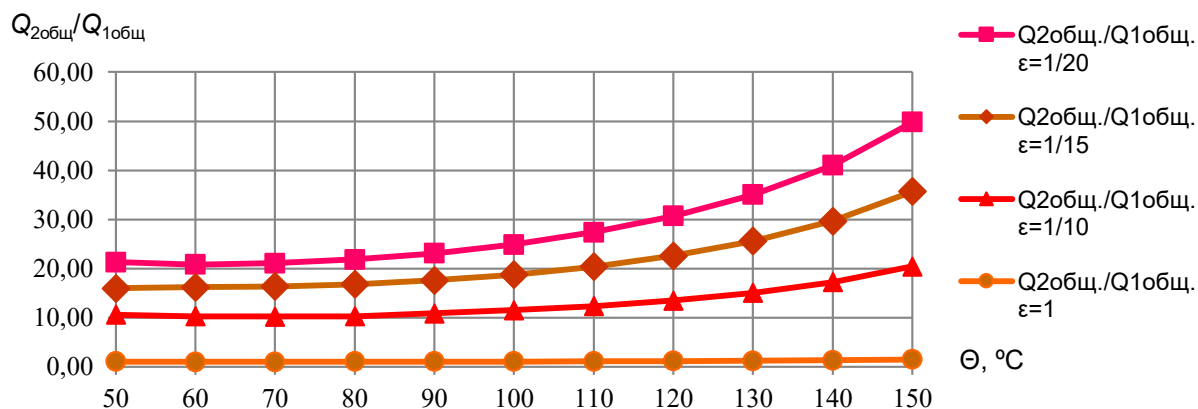


Рис. 6. Отношение тепловых затрат $Q_{2_{\text{общ}}} / Q_{1_{\text{общ}}}$ на нагрев сушильного агента в методе сушки нагретым воздухом и сушке в нагретом барабане

Fig. 6. The ratio of heat costs $Q_{2_{\text{total}}} / Q_{1_{\text{total}}}$ for heating the drying agent in the method of drying with heated air and drying in a heated drum

3. Метод сушки в поле СВЧ в период постоянной скорости приведен на схеме сушки (рис. 7).

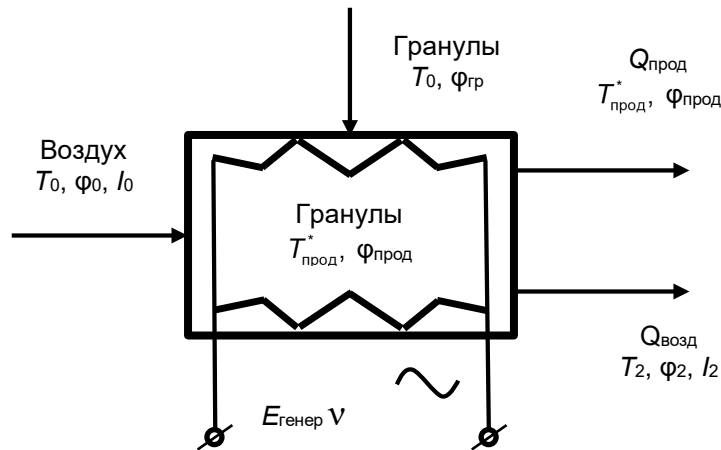


Рис. 7. Схема сушки в барабане интенсивным электромагнитным полем сверхвысокой частоты (СВЧ) с вытеснением влаги наружу непрогретым воздухом

Fig. 7. A drying scheme in a drum using an intense electromagnetic field of ultra-high frequency (UHF) with the displacement of moisture to the outside by unheated air

Граничные условия модельной задачи для процесса сушки представлены следующим образом:

Вход:
Исходный агент (воздух): $L_m, T_0, \phi_0, w_0, l_0$;
Гранулы: $G_1, T_{гр} = T_0, \phi_{гр} = 0,5, W_1 = G_c$.

Выход:
Отработанный агент: $L_{2m}, T_2, \phi_2, w_2, l_2$;
Гранулы: $G_2, T_{прод} = T_2, \phi_{прод} = 0,1, W_2 = G_c / 9$.

Определить $N_{генер.}, A_{генер.}, Q_{затр.}, Q_{прод.}$

Отличительной особенностью нагрева в поле СВЧ от других способов подвода тепла является быстрый прогрев материала до температуры $T = 60^\circ \text{C}$ (333 K) и более замедленное повышение до температуры $T = 90\text{--}100^\circ \text{C}$ (463–473 K). Релаксация градиента давления в материалах с высокой пористостью происходит мгновенно [5].

В ходе проведения экспериментов была построена зависимость времени сушки t от мощности N_r генератора СВЧ в интервале от 300 до 850 Вт при разном влагосодержании ϕ .

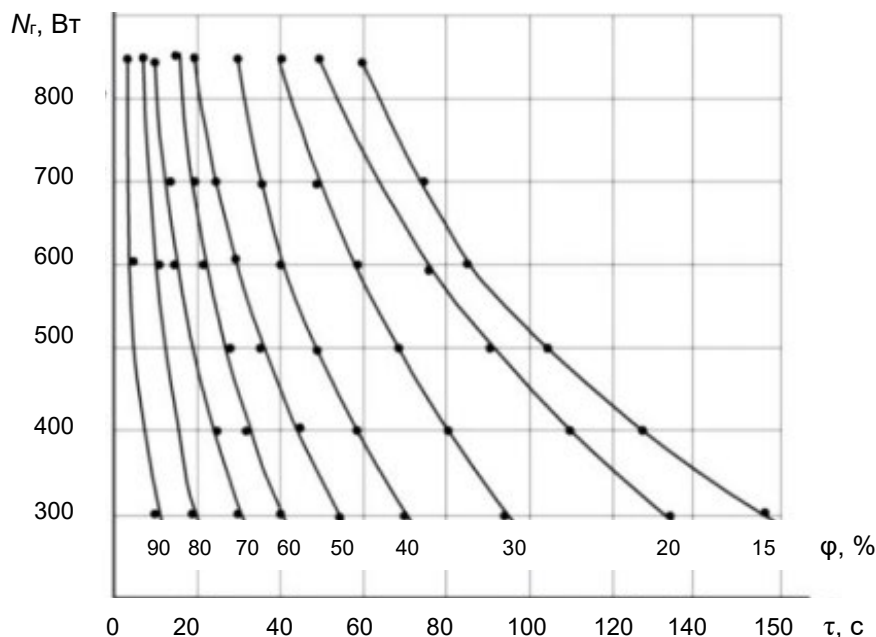


Рис. 8. Зависимость времени сушки τ от мощности генератора СВЧ для различных значений ϕ

Fig. 8. Dependence of drying time τ on the microwave generator power for different values of ϕ

Представленные на рис. 8 зависимости описаны уравнением

$$\tau = 1,5 \frac{Q}{N_r} e^{-0,028\varphi}. \quad (21)$$

Уравнение (21) позволяет рассчитать время сушки τ влажного материала от начального влагосодержания φ_0 до заданного текущего или до равновесного $\varphi_p = 0,1$ (10 %) в диапазоне изменения мощности генератора СВЧ от 300 до 850 Вт. Здесь Q – общие затраты энергии на достижение равновесного φ_p . Количество тепла, выделяемое в единице объема материала (Вт/м^3), определяется по полуэмпирической формуле:

$$Q_v = 5,55 \varepsilon_m \operatorname{tg}(\delta) \nu E^2 \cdot 10^{-11}, \quad (22)$$

где ε_m – диэлектрическая постоянная нагреваемого материала (для тканей $\varepsilon_m = 2$); $\operatorname{tg}(\delta)$ – тангенс угла диэлектрических потерь; ν – частота электрического поля, Гц; E – напряженность внешнего электрического поля, В/м.

При расчете источника тепла Q_v тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}(\delta)$ при обезвоживании материала уменьшается во всем диапазоне частот и существенно зависит от влагосодержания. Для материала с влажностью $\varphi \approx 8\text{--}12\%$ тангенс угла $\operatorname{tg}(\delta)$ лежит в пределах 0,02–0,06, а при влажности 30–100 % определяется как тангенс угла диэлектрических потерь по воде, содержащейся в тканях, и изменяется от 0,10–0,13 до 1,40 при влажности ткани $\varphi \approx 80\text{--}100\%$.

При изменении мощности генератора СВЧ от 300 до 850 Вт напряженность электрического поля E регулировали в диапазоне $E = (200\text{--}400) \cdot 10^2$ В/м.

Значения Q_v для тканей при средней влажности $\varphi \approx 30\text{--}60\%$ вычисляли при значениях $\varepsilon_m = 2$ для волокнистого материала и среднего значения тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}(\delta) \approx 0,10\text{--}0,13$. Значения мощности генератора СВЧ и напряженности электрического поля E принимали, соответственно, равными: $N_1 = 300$ Вт и $E_1 = 20\,000$ В/м; $N_2 = 600$ Вт и $E_2 = 28\,500$ В/м; $N_3 = 850$ Вт и $E_3 = 38\,500$ В/м.

Кинетика процесса сушки токами сверхвысокой частоты в принципе не отличается от других способов сушки. Отличие заключается в очень быстром прогреве материала до температур, близких к $T = 100^\circ\text{C}$. Интенсивность переноса влаги внутри материала при сверхвысокочастотном нагреве характеризуется величиной критерия Померанцева $Po = \frac{Q_v R_v^2}{\lambda_{вл} T_m}$, где Q_v – источник тепла, R_v – характерный размер гранул, м; $\lambda_{вл}$ – теплопроводность влажной гранулы, $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$; T – абсолютная температура влажной гранулы, К.

Тепло, подводимое к материалу, определяли по основному уравнению кинетики сушки:

$$r \frac{du}{d\tau} R_v \rho_0 (1 + K_C Rb) = Q_v R_v + q_k(\tau), \quad (23)$$

где r – теплота парообразования, Дж/кг ; $du/d\tau$ – скорость сушки, с^{-1} (u – среднее интегральное влагосодержание, %; τ – время сушки, с); ρ_0 – плотность сухого материала (гранулы), кг/м^3 ; $q_k(\tau)$ – мощность конвективного источника тепла;

K_C – критерий, учитывающий изменение теплоемкости влажного материала: $K_C = (c_{\text{сух}} + c_{\text{ж}}) / c_{\text{ж}}$, где $c_{\text{сух}}$, $c_{\text{ж}}$ – теплоемкости сухого тела и воды соответственно, $\text{Дж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$;

Rb – критерий Ребиндера, взятый по отношению к сухому материалу: $Rb = (c_{\text{сух}} b) / r$, где $b = dt / du$ – температурный коэффициент сушки, характеризующий испарение влаги из материала за малый промежуток времени.

Мощность теплового потока, подводимого к материалу

$$q = Q_v R_v F_u, \quad (24)$$

где F_u – поверхность испарения материала, м^2 .

Результаты расчета значений Q_v , критерия Померанцева Po и мощности тепловых потоков от напряженности электрического поля представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета основных энергетических параметров в поле СВЧ**Table 2. Results of calculation of the main energy parameters in the UHF field**

E , В/м	$Q_V \cdot 10^{-6}$, Вт/м ³	q , Вт	P_o	N_r , Вт
20 000	14,2	285	0,42	300
28 500	29,3	580	0,85	600
38 500	45,1	840	1,32	850

Мощность генератора СВЧ при сушке влажного материала определяли по экспериментальной зависимости [6]:

$$N_r = \frac{1,16(q_n + q_i + q_p)}{\eta_r \eta_k}, \quad (25)$$

где q_n – теплота, затраченная на нагрев влажного материала, Вт; q_i – теплота, затраченная на испарение влаги из материала, Вт; q_p – потери тепла в окружающую среду, Вт; η_r – КПД генератора, равный 0,65; η_k – КПД контура, равный 0,5.

Потери тепла в окружающую среду в процессе сушки: $q_p = 0,05(q_n + q_i)$.

Теплота на испарение влаги, Вт:

$$q_i = \frac{rjF_m}{3600}, \quad (26)$$

где r – теплота парообразования, Дж/кг; j – интенсивность испарения влаги, кг/(м²·ч); F_m – поверхность испарения материала, м².

Теплота на нагрев материала

$$q_n = \frac{G_c C_c (T_2 - T_m)}{\tau}, \quad (27)$$

где G_c – сухой вес торфа, кг; C_c – теплоемкость сухого торфа, кг/Дж; T_m – температура материала в момент начала фазового перехода воды в пар.

Теплота, затраченная на прогрев исходного материала гранул до начала испарения влаги, Вт:

$$Q_{\text{прогр}} = G_1 (C_c (1 - \varphi_{\text{гр}}) + C_{\text{ж}} \varphi_{\text{гр}}) (T_m - T_0), \quad (28)$$

где G_1 – вес влажного материала, кг; C_c и $C_{\text{ж}}$ – теплоемкости сухого торфа и воды соответственно, кг/Дж; τ – время прогрева влажного материала до начала потери им влаги, с.

В табл. 3 представлены затраты времени на сушку до заданной влажности капиллярно-пористого материала в поле сверхвысокой частоты (СВЧ) в зависимости от мощности излучателя, полученные как в эксперименте, так и путем расчета из уравнения (21).

Таблица 3. Сравнение значений времени τ с экспериментом и расчетом на основе уравнения (21)**Table 3. Comparison of time values τ with experiment and calculation based on equation (21)**

φ , %		10	15	20	30	40	50
$N_r = 300$ Вт	$\tau_{\text{экс}}$, с	183,55	160	135	98	76	56
	$\tau_{\text{расч}}$, с	180,19	158	133,5	100	76,4	57,7
$N_r = 600$ Вт	$\tau_{\text{экс}}$, с	95,58	82	72	55	41	30
	$\tau_{\text{расч}}$, с	90,13	78	68	51	39	29
$N_r = 850$ Вт	$\tau_{\text{экс}}$, с	69,93	59	50	39	29	20
	$\tau_{\text{расч}}$, с	64,54	56	48,5	36	27,5	20,7

На основе этих данных получена зависимость (21) времени сушки τ от мощности N_r генератора СВЧ в интервале от 300 до 850 Вт. Значения результатов расчета и экспериментальных данных на графиках определяли для образца с массой сухого материала 0,1 кг.

Общее уравнение теплового баланса для сушильной камеры

$$Q_{\text{затр}} = Q_{\text{прогр}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}} + 0,05(Q_{\text{прогр}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}}) = 1,05(Q_{\text{прогр}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}}), \quad (29)$$

где $Q_{\text{н}}$ – теплота на нагрев материала: $Q_{\text{н}} = G_c C_c (T_2 - T_m)$; $Q_{\text{и}}$ – теплота на испарение влаги: $Q_{\text{и}} = rjF_m = rU$, где U – масса водяного пара в расчете на 1 кг исходного материала.

Соответственно, затраты энергии на работу генератора определяли уравнением

$$A_{\text{генер}} = Q_{\text{затр}} / (\eta_r \eta_k) = 1,05(Q_{\text{прогр}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{и}}) / (\eta_r \eta_k), \quad (30)$$

Так, в частности, на сушку 1 кг торфяных гранул с начальной влажностью $\varphi_{\text{гр}} = 0,5$ до влажности $\varphi_{\text{прод}} = 0,1$ для генератора СВЧ потребуется приблизительно 4,7 МДж энергии, что равноценно потреблению электроэнергии 1,3 кВт·ч.

Более подробно общие затраты тепла на сушку 1 кг материала для рассмотренных методов сушки: по схеме на рис. 3 – в нагретом барабане до заданной температуры, по схеме на рис. 4 – нагретым воздухом в теплоизолированном барабане для скоростей движения воздуха V , равных $V_{\text{выт}}$, $10V_{\text{выт}}$, $15V_{\text{выт}}$, $20V_{\text{выт}}$, где $V_{\text{выт}} \approx 0,05\text{--}0,15$ м/с, а также по схеме на рис. 7 – методом СВЧ приведены в сводной табл. 4 для диапазона температур от 95 °С до 105 °С соответственно.

Таблица 4. Результаты общих тепловых затрат на сушку 1 кг материала по схеме на рис. 3 для скорости $V = V_{\text{выт}}$, на рис. 4 для скоростей $V = V_{\text{выт}}$, $V = 10V_{\text{выт}}$, $V = 15V_{\text{выт}}$, $V = 20V_{\text{выт}}$ и на рис. 7 в диапазоне температур от 95 °С до 105 °С

Table 4. Results of total heat consumption for drying 1 kg of material on the scheme in fig. 3 for the speed $V = V_{\text{displ}}$ and in fig. 4 for the speeds $V = V_{\text{displ}}$, $V = 10V_{\text{displ}}$, $V = 15V_{\text{displ}}$, $V = 20V_{\text{displ}}$ and in fig. 7 in the temperature range from 95 °С to 105 °С

$T, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{общ.}}, \text{Дж (рис. 3)}$ $V = V_{\text{выт}}$	$Q_{\text{общ.}}, \text{Дж (рис. 4)}$				$Q_{\text{общ.}}, \text{Дж (рис. 7)}$ СВЧ
		$V = V_{\text{выт}}$	$V = 10V_{\text{выт}}$	$V = 15V_{\text{выт}}$	$V = 20V_{\text{выт}}$	
95	2 176 730	2 366 132	24 485 066	39 518 437	52 114 731	4 932 796
96	2 150 464	2 325 022	24 315 227	39 297 543	51 881 599	4 9484 20
97	2 125 219	2 315 843	24 158 543	39 098 111	51 676 759	4 964 043
98	2 100 945	2 295 633	24 014 906	38 919 854	51 499 292	4 979 667
99	2 077 593	2 274 670	23 883 600	38 761 635	51 348 325	4 995 291
100	2 055 119	2 255 053	23 764 372	38 623 060	51 223 181	5 010 914
101	2 033 483	2 239 743	23 656 921	38 503 412	51 123 025	5 026 538
102	2 012 645	2 222 315	23 560 780	38 402 307	51 047 223	5 042 162
103	1 992 568	2 207 094	23 475 745	38 319 272	50 995 262	5 057 786
104	1 973 220	2 190 854	23 401 405	38 253 848	50 966 595	5 073 409
105	1 954 566	2 178 239	23 337 656	38 205 603	50 960 749	5 089 033

Наглядное представление об общих затратах, приведенных в табл. 4 для указанного диапазона температур, дает рис. 9.

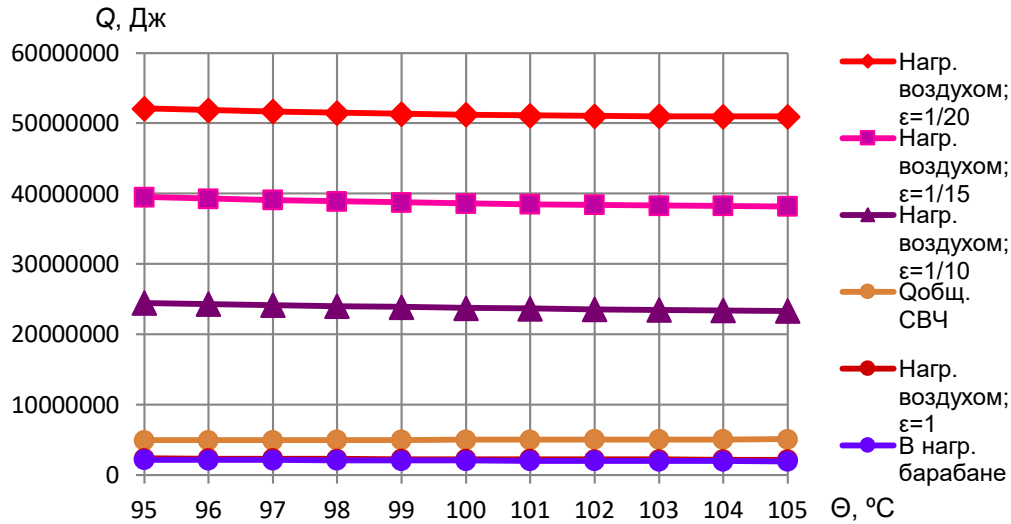


Рис. 9. Общие затраты тепла для метода сушки 1 кг материала в нагретом барабане, нагретым воздухом и СВЧ по схеме на рис. 3 для скорости $V = V_{\text{выт}}$, на рис. 4 для скоростей $V = V_{\text{выт}}$, $V = 10V_{\text{выт}}$, $V = 15V_{\text{выт}}$, $V = 20V_{\text{выт}}$ и на рис. 7 в диапазоне температур от 95 °C до 105 °C

Fig. 9. Total heat consumption for the method of drying 1 kg of material in a heated drum, heated air and microwave on the scheme in fig. 3 for the speed $V = V_{\text{displ}}$ and in fig. 4 for the speeds $V = V_{\text{displ}}$, $V = 10V_{\text{displ}}$, $V = 15V_{\text{displ}}$, $V = 20V_{\text{displ}}$ and in fig. 7 in the temperature range from 95 °C to 105 °C

Закключение. Анализ сушки сыпучего материала (торфяных гранул) рассмотренными выше методами 1, 2, и 3 показал, что самым экономичным способом сушки с точки зрения затрат тепла в рамках проведенного анализа является способ сушки по схеме 1, т. е. сушка в нагретом до постоянной температуры барабане с вытеснением влаги наружу атмосферным воздухом. Данный способ сушки удобен тем, что для него не требуется дополнительного энергопотребляющего оборудования. В этой схеме сушки лишь незначительно увеличиваются транспортные расходы для подачи атмосферного воздуха.

Сушка при низкой температуре, т. е. менее 60 °C для любой из схем 1 и 2 становится энергозатратной ввиду резкого увеличения расхода сушильного агента (атмосферного воздуха). Даже без учета увеличения транспортных потерь значительное количество тепловой энергии затрачивается на работу расширения сушильного агента при его нагревании в процессе вытеснения влажного воздуха из сушильной камеры (барабана). Как показывают расчетные зависимости, чем выше температура в сушильной камере (барабане), тем меньше расход сушильного агента и, следовательно, меньше тепловой энергии тратится на работу расширения сушильного агента при его нагревании. При изменении температуры сушки от 50 °C до 110 °C отношение затрат тепла на нагрев агента к затратам тепла на его изобарическое расширение меняется от 2,3 до 10. При этом сами затраты тепловой энергии уменьшаются, соответственно: в более чем 3 раза – затраты на нагрев и более чем в 23,5 раза – затраты на изобарическое расширение сушильного агента. Соответственно, общие затраты уменьшаются почти в 5 раз. При дальнейшем увеличении температуры в сушильной камере до 150 °C, согласно проведенному анализу, тепловые затраты энергии уменьшаются на общий нагрев в 5,86 раза, а потеря тепловой энергии на расширение – почти в 100 раз. Именно уменьшение расхода сушильного агента и влечет, главным образом, уменьшение тепловых потерь на расширение сушильного агента при его нагревании. В данном случае оценочные расчеты показали, что при увеличении температуры сушки с 50 °C до 150 °C расход атмосферного воздуха уменьшается почти в 300 раз. Даже при увеличении температуры сушки только до 100–110 °C, которая бывает предельно допустимой при сушке некоторых органических материалов, расход атмосферного воздуха уменьшается в 34–50 раз, что, в свою очередь, уменьшает потери тепла на изобарическое расширение воздуха в 17–23,5 раза.

Анализ сушки материала торфяных гранул методом СВЧ показал, что даже при наиболее оптимальном температурном режиме (95–105 °C) затраты энергии для работы генератора СВЧ в 2,65–3 раза превышают затраты энергии на сушку по методу 1. При этом, как показывают полученные зависимости, эти затраты не зависят от мощности генератора СВЧ и являются неизбежными при таком способе сушки. Следует ожидать, что затраты энергии на сушку методом СВЧ при увеличении объема высушиваемого материала будут еще более возрастать, ввиду возрастания доли излучения СВЧ во

внешнее пространство с увеличением размера излучающего контура. Более того, данный метод сушки ограничен по температурному режиму, т. е. нецелесообразно увеличивать температуру сушки, поскольку это лишь приводит к дополнительному нагреву высушиваемого материала и, как следствие, к увеличению потерь тепловой энергии.

Наконец анализ сушки того же материала по методу 2, т. е. методом обдува торфяных гранул нагретым до заданной температуры воздухом (сушильным агентом) в теплоизолированном барабане является наиболее затратным способом сушки. Рассмотренная для данного способа сушки модельная задача показала, что тепловые потери быстро возрастают, если скорость движения нагретого воздуха (скорость обдува материала) в сушильной камере (барабане) заметно отличается от скорости вытеснения влаги по методу сушки материала в нагретом барабане. Даже при движении нагретого воздуха в сушильной камере (барабане) со скоростью его вытеснения (как при сушке в нагретом барабане) тепловые затраты при таком способе сушки (нагретым воздухом в теплоизолированном барабане) превышают затраты тепла нагретого барабана в 1,1–1,3 раза для температур 100–110 °С и почти в 1,5 раза для температуры 150 °С. Это связано с тем, что при сушке нагретым воздухом (сушильным агентом) уменьшается его температура при удалении влаги из высушиваемого материала и поэтому процесс сушки протекает при пониженной температуре в отличие от процесса сушки в нагретом барабане. Этот недостаток способа сушки компенсируется дополнительным количеством сушильного агента и затратами тепла на его нагрев от исходной температуры (окружающего воздуха) до заданной температуры на входе в сушильную камеру (барабан).

Таким образом, для производственных масштабов сушка нагретым воздухом в барабане является весьма затратной в результате низкого КПД ввиду неэффективного теплообмена между сушильным агентом и высушиваемым материалом. Метод сушки СВЧ может использоваться только при относительно небольших объемах высушиваемого материала также ввиду малого КПД генератора и излучающего контура. Сушка материала методом СВЧ хотя и позволяет существенно сократить время процесса, однако сам режим сушки будет ограничен прочностью высушиваемого материала, а не мощностью генератора излучения СВЧ.

Список используемых источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с. : ил.
2. Лыков, М. В. Сушка в химической промышленности / М. В. Лыков. – М. : Химия, 1970. – 432 с.
3. Ольшанский, А. И. Кинетика тепловлагоденоса и температура в процессе сушки тканей / А. И. Ольшанский, А. С. Марущак // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 449–457.
4. Саломатов, В. В. Электромагнитная сушка влажных материалов с малой глубиной проникновения СВЧ-излучения в условиях теплосброса радиацией и конвекцией I. Стадия прогрева / В. В. Саломатов, В. А. Карелин, В. В. Саломатов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 10. – С. 49–60.
5. Саломатов, В. В. Электромагнитная сушка влажных материалов с малой глубиной проникновения СВЧ-излучения в условиях теплосброса радиацией и конвекцией II. Стадия постоянной скорости сушки / В. В. Саломатов, В. А. Карелин, В. В. Саломатов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 12. – С. 119–125.
6. Саломатов, В. В. Электромагнитная сушка влажных материалов с малой глубиной проникновения СВЧ-излучения в условиях теплосброса радиацией и конвекцией III. Стадия падающей скорости сушки / В. В. Саломатов, В. А. Карелин, В. В. Саломатов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 4. – С. 139–147.

References

1. Lykov A. V. Drying Theory. Moscow, Energiya Publ., 1968, 472 p.
2. Lykov M. V. Drying in the chemical industry. Moscow, Chemistry Publ., 1970, 432 p.
3. Olshansky A. I., Marushchak A. S. *Kinetika teplovlagoperenosa i temperatura v processe sushki tkanej* [Kinetics of heat and moisture transfer and temperature during fabric drying]. *Vestci Natsionalnay akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Gray physics-technical sciences, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 449–457.
4. Salomatov V. V., Karelin V. A., Salomatov V. V. *Elektromagnitnaya sushka vlazhnykh materialov s maloj glubinoj proniknoveniya SVCh-izlucheniya v usloviyakh teplosbrosa radiaciej i konvekciej I. Stadiya progreva* [Electromagnetic drying of wet materials with a shallow penetration depth of microwave radiation under conditions of heat transfer by radiation and convection I. Heating stage]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* = *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 49–60.

5. Salomatov V. V., Karelin V. A., Salomatov V. V. *Elektromagnitnaya sushka vlazhnykh materialov s maloj glubinoj proniknoveniya SVCh-izlucheniya v usloviyah teplosbrosa radiaciej i konvekcij II. Stadiya postoyannoj skorosti sushki* [Electromagnetic drying of wet materials with a shallow penetration depth of microwave radiation under conditions of heat transfer by radiation and convection II. Stage of constant drying rate]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 119–125.
6. Salomatov V. V., Karelin V. A., Salomatov V. V. *Elektromagnitnaya sushka vlazhnykh materialov s maloj glubinoj proniknoveniya SVCh-izlucheniya v usloviyah teplosbrosa radiaciej i konvekcij III. Stadiya padayushchej skorosti sushki* [Electromagnetic drying of wet materials with a shallow penetration depth of microwave radiation under conditions of heat transfer by radiation and convection III. Stage of decreasing drying rate]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 139–147.

Информация об авторах

Калантаров Михаил Георгиевич – кандидат биологических наук, ведущий инженер, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Сорокин Александр Иванович – кандидат технических наук, заместитель директора Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Шилович Николай Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет (Партизанский пр-т, 26, 220070, г. Минск, Беларусь). E-mail: shilnn@tut.by

Янута Юрий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Института природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Information about the authors

Mikhail G. Kalantarov – Ph. D. (Biological), leading engineer, 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

Alexander I. Sorokin – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, deputy director of the 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

Nikolay N. Shilovich – Ph. D. (physical and mathematical), Associate Professor, Belarusian State Economic University (Partizansky Ave., 26, 220070, Minsk, Belarus). E-mail: shilnn@tut.by

Yuriy G. Yanuta – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, deputy director of the 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

УДК 504.054:54

Поступила в редакцию 13.10.2025

Received 13.10.2025

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОДУКТОВ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ТОРФОВ

В. М. Крайко, В. М. Дударчик, Ю. Г. Янута,
Е. В. Ануфриева, Е. Ю. Дорожко, Ю. Ю. Навоша

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Повышенный интерес к свойствам и способам получения фульвоподобных кислот из природных каустобиолитов, включая в первую очередь различные торфа, вызван появлением в их структуре композиций, обеспечивающих способность к комплексообразованию с редкоземельными и тяжелыми металлами, включая востребованные в атомной энергетике уранилы. Использование указанных фульвоподобных кислот в разрабатываемых новых технологиях добычи редких и тяжелых металлов рассматривается как очень перспективное. В предлагаемой статье приведен сравнительный анализ физико-химических свойств фульвоподобных кислот, полученных методом окислительной деструкции торфов и гуминовых веществ исходных торфов.

Анализ данных ИК-спектроскопии исходных торфов (низинного и верхового) и продуктов их окисления пероксидом водорода показал, что в процессе окислительной деструкции происходит разрушение полисопряженных структур торфа с образованием продуктов с высоким содержанием карбонильных групп, способствующих комплексообразованию.

Выявлено, что окислительная деструкция торфа приводит к уменьшению содержания углерода и повышению содержания водорода и кислорода, а также к снижению оптической плотности их растворов и повышению растворимости. Полученное молекулярно-массовое распределение на Sephadex G-50 исходных гуминовых кислот и фульвоподобных кислот показало, что процессы деструкции ведут к уменьшению молекулярных масс макромолекул фульвоподобных кислот по сравнению с исходными гуминовыми кислотами.

Ключевые слова: торф; гуминовые кислоты; фульвокислоты; фульвоподобные кислоты; окислительная деструкция; ИК-спектроскопия, гель-хроматография; элементный анализ.

Для цитирования. Крайко В. М., Дударчик В. М., Янута Ю. Г., Ануфриева Е. В., Дорожко Е. Ю., Навоша Ю. Ю. Физико-химическая характеристика продуктов окислительной деструкции торфов // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 172–181.

PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF PEAT OXIDATIVE DEGRADATION PRODUCTS

V. M. Kraiko, V. M. Dudarchik, Yu. G. Yanuta,
E. V. Anufrieva, E. Yu. Dorozhko, Yu. Yu. Navosha

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

Abstract. The increased interest in the properties and methods of producing of fulvic-like acids from natural caustibolites, including primarily various peat, is caused by the appearance in their structure of compositions that provide the ability to complex formation with rare earth and heavy metals, including uranium demanded in nuclear power. The use of these fulvic-like acids in developing new technologies for the extraction of rare and heavy metals is considered to be very promising. The proposed article provides a comparative analysis of the physical and chemical properties of fulvic-like acids obtained by oxidative decomposition of peat and the humic substances of the initial peat.

Analysis of IR spectroscopy data of the initial peat (lowland and upland) and products of their oxidation with hydrogen peroxide showed that in the process of oxidative destruction occurs the breakdown of the poly-stranded structures of the peat with the formation of products with high content of carbonyl groups, that promote complex formation.

It was found that the oxidative destruction of peat leads to a reduction in carbon content and an increase in hydrogen and oxygen, as well as a decrease in the optical density of their solutions and an increase in solubility. The obtained molecular-mass distribution on Sephadex G-50 of initial humic acids and fulvic-like acids showed that destruction processes lead to a decrease in molecular weights of macromolecules of fulvic-like acids compared to the original humic acids.

Keywords: peat; humic acid; fulvic acids; fulvic-like acids; oxidative degradation; IR spectroscopy, gel chromatography; elemental analysis.

For citation. Kraiko V. M., Dudarchik V. M., Yanuta Yu. G., Anufrieva E. V., Dorozhko E. Yu., Navosha Yu. Yu. Physico-chemical characteristics of peat oxidative degradation products. *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 172–181.

Введение. Интерес к гуминовым веществам (ГВ) как природным высокомолекулярным соединениям, обладающим рядом перспективных свойств, в настоящее время высокий. При этом сравнительно новой областью применения таких соединений является их использование в качестве природных комплексообразователей [1–4]. В зависимости от структурных особенностей ГВ могут образовывать как нерастворимые комплексы с ионами металлов, включая тяжелые и редкоземельные, так и растворимые. В последнем случае речь идет о такой составляющей ГВ, как фульвокислоты (ФК).

Способность к избирательному выщелачиванию из минеральных пород тяжелых металлов (ТМ) и образованию устойчивых комплексов обуславливает важную роль ГВ в процессах «рудобразования». Известно участие их в формировании урансодержащих, золотоносных руд, а также бокситов [5]. Особую роль в этом процессе играют ФК. Меньшая молекулярная масса, менее конденсированное ароматическое ядро и высокое содержание полярных групп увеличивает растворимость и подвижность ФК и их комплексов по сравнению с гуминовыми кислотами (ГК). Ограничением в применении ФК является их невысокое содержание в природном сырье, составляющее порядка 5–15 %. С помощью метода окислительной деструкции торфа пероксидом водорода, описанного в работе [6], значительно увеличивается выход водорастворимых фульвоподобных кислот (ФПК). 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 и ТМ, что является определяющим при их использовании в качестве добавок в геотехнологические растворы в технологиях подземного скважинного, чанового либо кучного выщелачивания.

Цель работы – провести сравнительный анализ физико-химических свойств ГК исходных торфов и ФПК, образованных в процессе окислительной деструкции.

Материалы и методы исследований. Выбор торфяного сырья с целью его химической модификации осуществляли на основе исследований [7]. Проведенный согласно работе [8] групповой анализ показал, что наиболее перспективными для химической модификации являются такие торфа, как пушицевый верхового типа и осоковый низинного типа. В этой связи для дальнейших исследований нами был использован торф месторождения «Туршовка – Чертово»: низинный, осоковый ($R = 30 \%$, $W = 47,7 \%$, $A^c = 2,2 \%$) и верховой, пушицевый ($R = 35 \%$, $W = 43,2 \%$, $A^c = 1,2 \%$). Исследуемые образцы торфа являются типичными и широко распространены в Беларуси.

Элементный состав образцов определяли в Центре аналитических и спектральных измерений Института физики НАН Беларуси на CHNOS-анализаторе VARIO EL, а оптическую плотность растворов – на колориметре КФК-2МП.

Структурные изменения, протекающие при окислительной модификации, изучали методом ИК-спектроскопии. ИК-спектры исходных и окисленных торфов регистрировали на ИК-спектрофотометре с Фурье-преобразованием IRPrestige-21 (Shimadzu) методом нарушенного полного внутреннего отражения. При исследовании использовали приставку однократного отражения MIRacle с призмой ZnSe.

Оценку изменения молекулярной массы проводили методом гель-хроматографии с использованием Sephadex G-50 [9]. В качестве элюента использовали 0,01 М раствор LiOH, скорость элюации составила 0,026 г/с. Фракции отбирали через 5 мин объемом 4 см³ с помощью коллектора фракций Dombifrac D-003. Анализ проводили на спектрофотометре СФ-46 при длине волны 211 нм и толщине кюветы 10 мм. В качестве раствора сравнения применяли 0,01 М раствор LiOH.

Калибровку проводили с помощью лигносульфонатов (LS) с известной молекулярной массой (49 000 Да, 8500 Да, 3000 Да), содержание во фракциях LS определяли при длине волны 280 нм, характерной для светопоглощения ОН-фенольных групп. Для нахождения внешнего объема колонки использовали Dextran blue с молекулярной массой 2 000 000 Да, оптическую плотность (D) во фракциях определяли при длине волны 380 нм. Полный объем колонки получали с использованием водного раствора ванилина (молекулярная масса 152 Да) с концентрацией вещества 1 г/дм³. Содержание ванилина в пробе находили при длине волны 270 нм.

Результаты, необходимые для построения калибровочного графика, сведены в табл. 1.

Таблица 1. Сводная таблица параметров, необходимых для построения калибровочной хроматограммы

Table 1. Summary table of parameters required for the calibration chromatogram

Вещество	Молекулярная масса вещества, Да	M_e , г	K_d	$\sqrt{M_w}$	$\sqrt[3]{K_d}$
Dextran blue	2 000 000	16,6	0	1414,2	0
LS	49 000	17,6	0,02	94,86	0,271
	8500	25,34	0,175	89,44	0,559
	3000	33,5	0,339	59,16	0,697
Ванилин	152	50	1	12,32	1,0

Примечание: M_e – масса выхода; K_d – коэффициент распределения; $\sqrt{M_w}$ – среднемассовая молекулярная масса; $\sqrt[3]{K_d}$ – среднемассовый коэффициент распределения.

На рис. 1 представлена калибровочная гель-хроматограмма для определения параметров гель-хроматографической колонки.

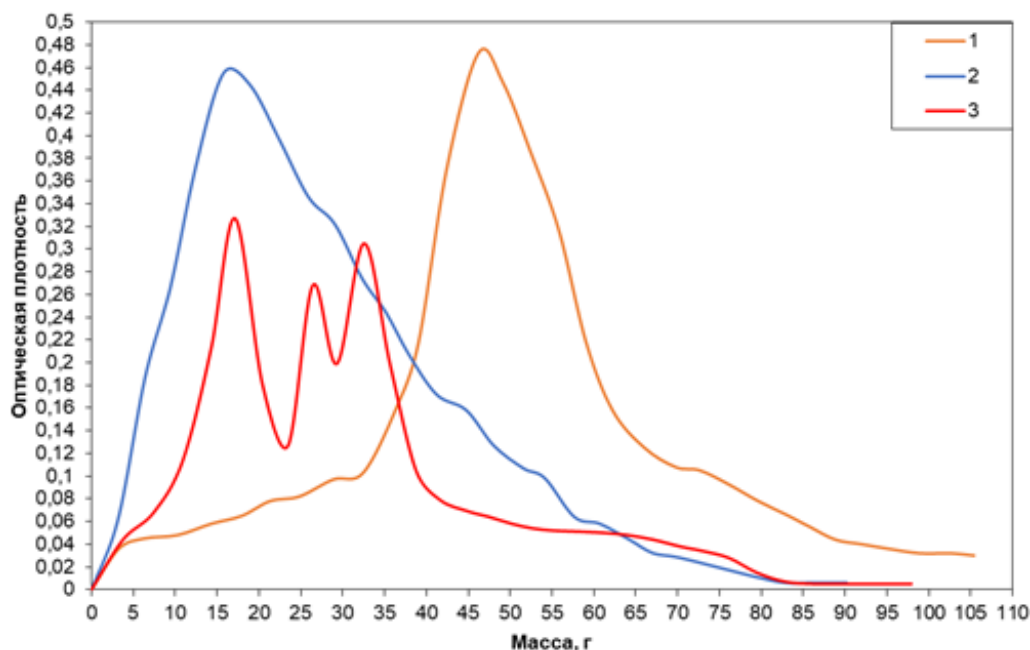


Рис. 1. Калибровочная гель-хроматограмма колонки:
1 – ванилин; 2 – Dextran blue; 3 – лигносульфонаты

Fig. 1. Calibration gel-chromatogram of column:
1 – vanillin; 2 – Dextran blue; 3 – lignosulfonates

Из данного рисунка следует, что внешний объем колонки (внешняя масса) по Dextran blue составил 16,6 г, а полный объем (полная масса) колонки по ванилину – 50 г.

Результаты и их обсуждение. Исследуемые торфа являются типичными по элементному составу (табл. 2). Содержание углерода в пушицевом торфе выше, чем в осоковом, кислорода больше в осоковом торфе.

Таблица 2. Элементный состав торфов и продуктов их окислительной деструкции

Table 2. Elemental composition of peats and products of their oxidative degradation

Образец	Элементный состав, % на ОВ						
	C	H	N	S	O	C : H	C : O
<i>Осоковый торф (R = 30 %, A^C = 2,2 %)</i>							
Исходный торф	55,72	7,35	2,92	0,65	33,36	7,58	1,67
Окисленный торф	53,95	7,45	3,06	0,31	35,23	7,24	1,53
Водорастворимые вещества	37,60	6,62	3,24	0,48	52,06	5,68	0,72
<i>Пушицевый торф (R = 35 %, A^C = 1,2 %)</i>							
Исходный торф	60,90	6,90	1,16	0,27	30,77	8,83	1,98
Окисленный торф	57,64	7,37	1,21	0,21	33,57	7,82	1,72
Водорастворимые вещества	39,17	5,83	1,79	0,35	52,86	6,72	0,74

Окислительная деструкция торфа приводит к уменьшению содержания углерода и повышению водорода и кислорода. Так, отношение C : O для окисленных препаратов торфа по сравнению с исходными падает (см. табл. 2). Наиболее богаты кислородом водорастворимые продукты окислительной деструкции, отношение C : O для которых значительно ниже, чем у исходных торфов. Содержание в их составе углерода и водорода также низкое.

На рис. 2–4 приведены ИК-спектры поглощения исходных (верхового и низинного) торфов и их окисленных пероксидом водорода форм.

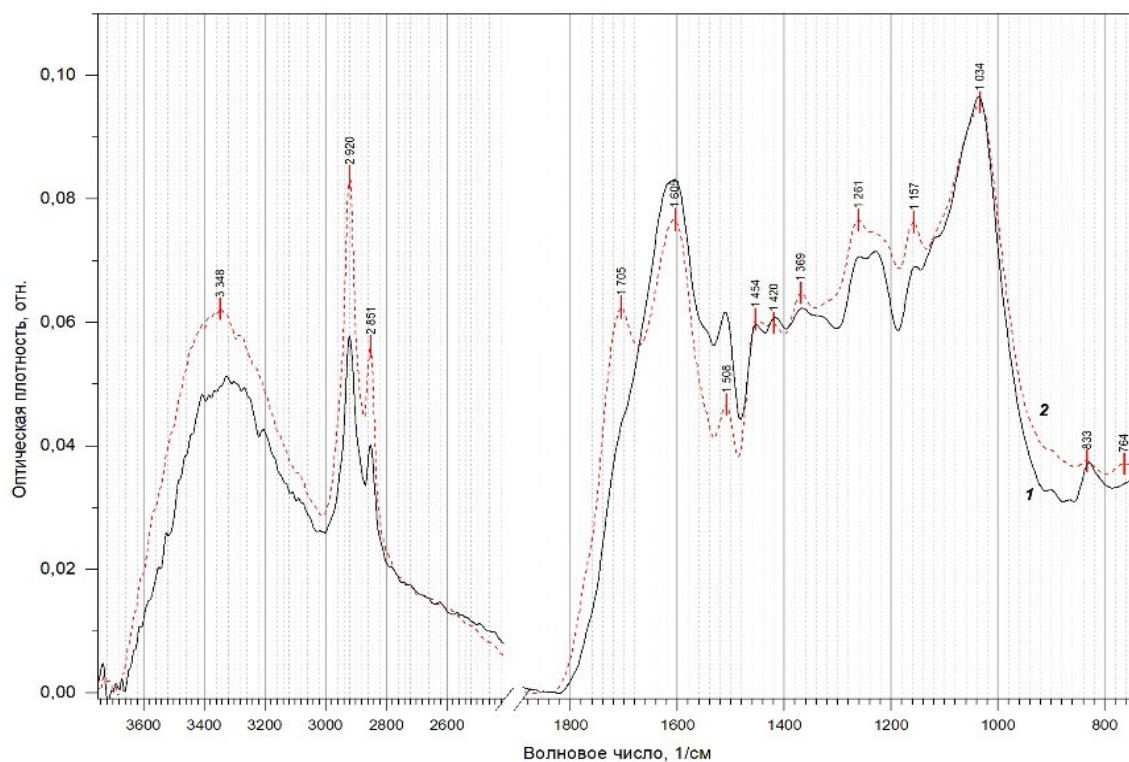


Рис. 2. ИК-спектры низинного (1) и верхового (2) торфа

Fig. 2. IR-spectra of lowland (1) and upland (2) peat

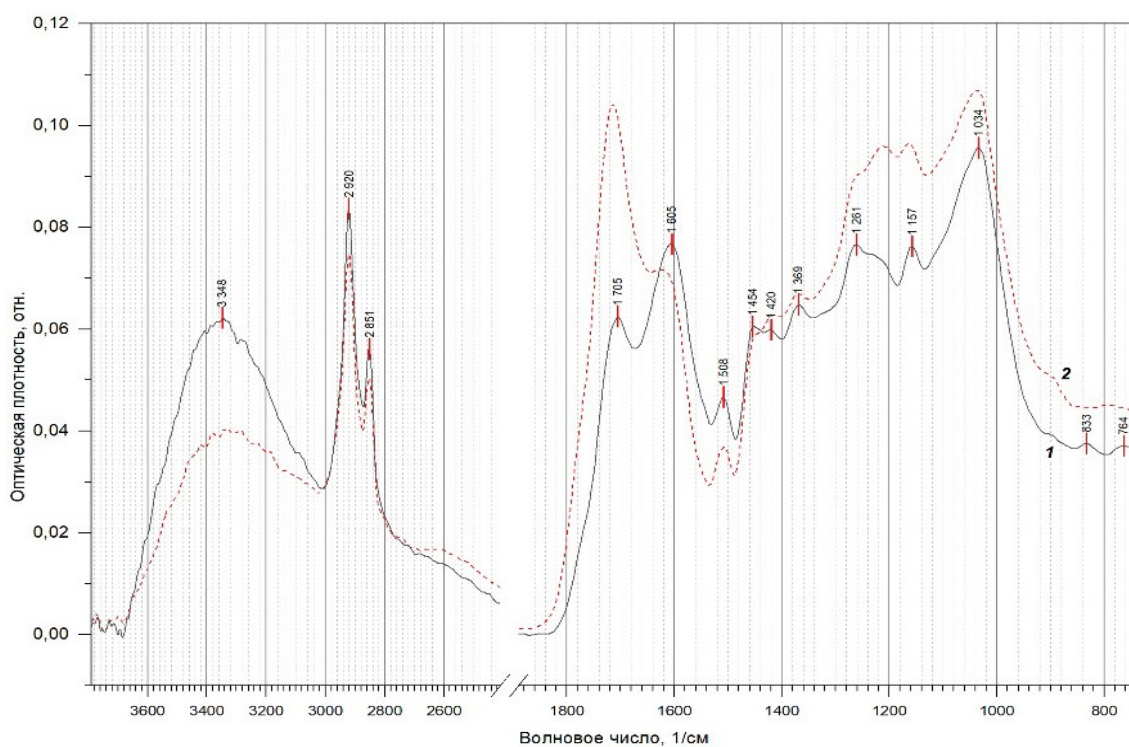


Рис. 3. ИК-спектры исходного верхового торфа (1) и продуктов его окислительной деструкции (2)

Fig. 3. IR-spectra of the initial upland peat (1) and its oxidative degradation products (2)

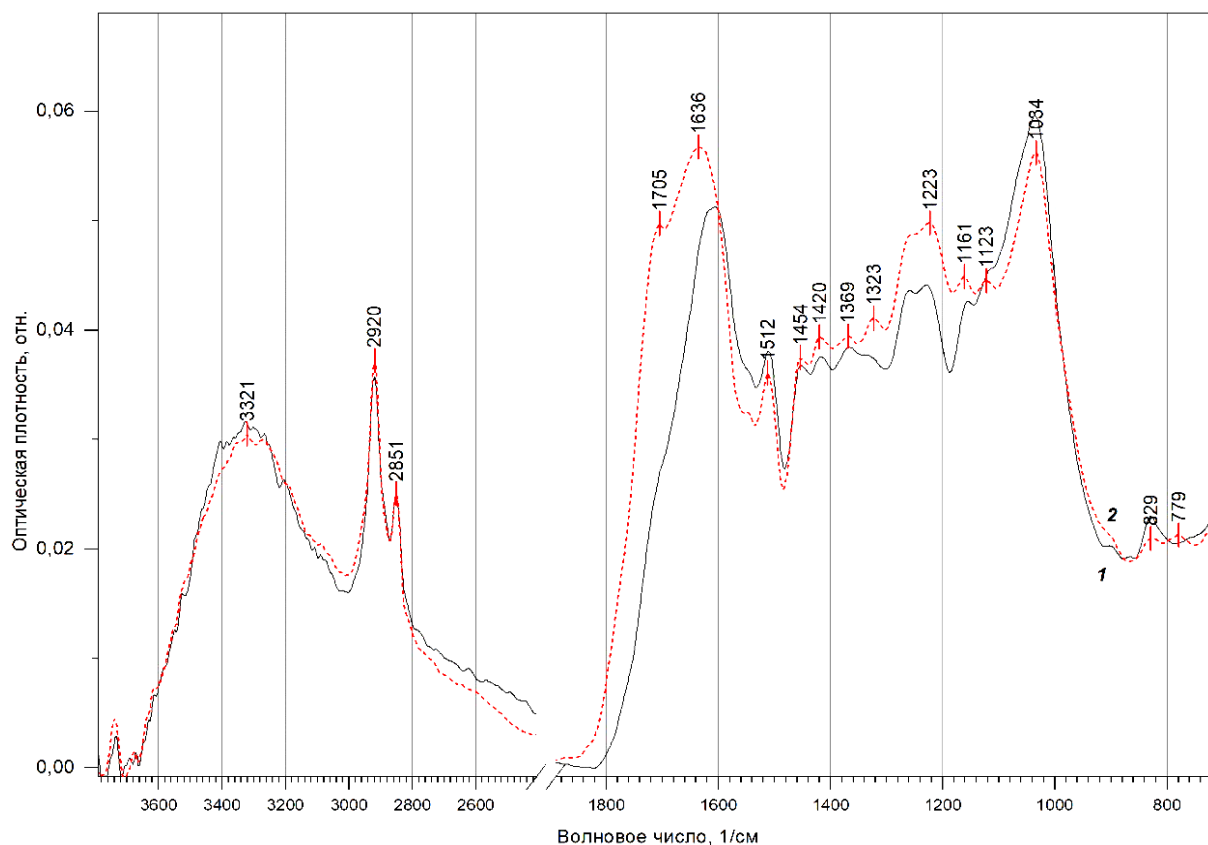


Рис. 4. ИК-спектры исходного низинного торфа (1) и продуктов его окислительной деструкции (2)

Fig. 4. IR-spectra of the initial lowland peat (1) and its oxidative degradation products (2)

Как следует из данных ИК-спектроскопии, спектры исследованных образцов торфов являются типичными для торфов сравнительно невысокой степени разложения и характеризуются полосами в следующих областях:

3300–3400 cm^{-1} – ν_{OH} – поглощение валентных колебаний гидроксильных групп углеводов, воды;

2920 и 2850 cm^{-1} – ν_{CH} – поглощение валентных колебаний CH_2 - и CH_3 -групп;

1705 cm^{-1} – $\nu_{\text{C=O}}$ – валентные колебания карбонильных групп кислот;

1600–1620 cm^{-1} – $\nu_{\text{C=C}}$ – валентные колебания углеродных C=C сопряженных двойных связей конденсированных ароматических структур, C=O первичных амидов;

1508 cm^{-1} – $\nu_{\text{C=C}}$ – валентные колебания C=C моноароматических структур;

1460–1390 cm^{-1} – плоскостные деформационные колебания CH_2 - и CH_3 -групп;

1270–1220 cm^{-1} – $\nu_{\text{C-O}}$ карбоксильных групп, δ_{OH} фенолов;

1160–1040 cm^{-1} – $\nu_{\text{C-O}}$ углеводовных фрагментов;

1000–700 cm^{-1} – внеплоскостные деформационные колебания $=\text{C-H}$ -групп.

Сравнение спектров верхового и низинного торфов показывает, что верховой торф отличается от низинного более высоким содержанием CH_2 - и CH_3 -групп. Окисление торфов перекисью водорода практически не влияет на интенсивность полос валентных колебаний CH_2 - и CH_3 -групп в случае низинного торфа и приводит к незначительному уменьшению их интенсивности для верхового торфа.

С целью количественной оценки интенсивности накладываются полосы поглощения в области 1490–1880 cm^{-1} было выполнено разложение этого участка спектра исследованных образцов на составляющие полосы и рассчитана их относительная интенсивность (табл. 3). На рис. 5 в качестве примера приведено разложение участка спектра окисленного образца верхового торфа.

Как следует из полученных данных (см. табл. 3), обработка торфов пероксидом водорода приводит к уменьшению интенсивности полос поглощения валентных колебаний C=C моноароматических структур (1508 cm^{-1}) и валентных колебаний углеродных C=C сопряженных двойных связей конденсированных ароматических структур (1600–1620 cm^{-1}). При этом снижение интенсивности указанных полос в большей степени проявляется в случае верхового торфа. Полученные результаты согласуются с данными элементного анализа: ароматичность ($\text{C} : \text{H}$) в большей степени снижается в окисленном верховом торфе, а в водорастворимых продуктах верхового торфа значение $\text{C} : \text{H}$ более высокое по сравнению с водорастворимыми соединениями низинного торфа.

Таблица 3. Относительная интенсивность полос поглощения исследованных образцов торфа в области 1880–1490 см^{-1} **Table 3. Relative intensity of absorption bands of the investigated peat samples in the 1880–1490 см^{-1} area**

Область спектра, см^{-1}	Низинный торф			Верховой торф		
	$I_{\text{исх}}, \%$	$I_{\text{окисл}}, \%$	$I_{\text{окисл}} / I_{\text{исх}}$	$I_{\text{исх}}, \%$	$I_{\text{окисл}}, \%$	$I_{\text{окисл}} / I_{\text{исх}}$
1508–1512	15,0	13,5	0,9	8,7	4,8	0,5
1600–1640	69,0	48,5	0,7	60,2	44,2	0,7
1705	16,0	38,0	2,4	28,8	46,6	1,6
1780	—	—	—	2,3	4,4	2,0

Примечание: $I_{\text{исх}}$ и $I_{\text{окисл}}$ — интенсивность исходной и окисленной форм полос соответственно по отношению к общему поглощению в области 1880–1490 см^{-1} .

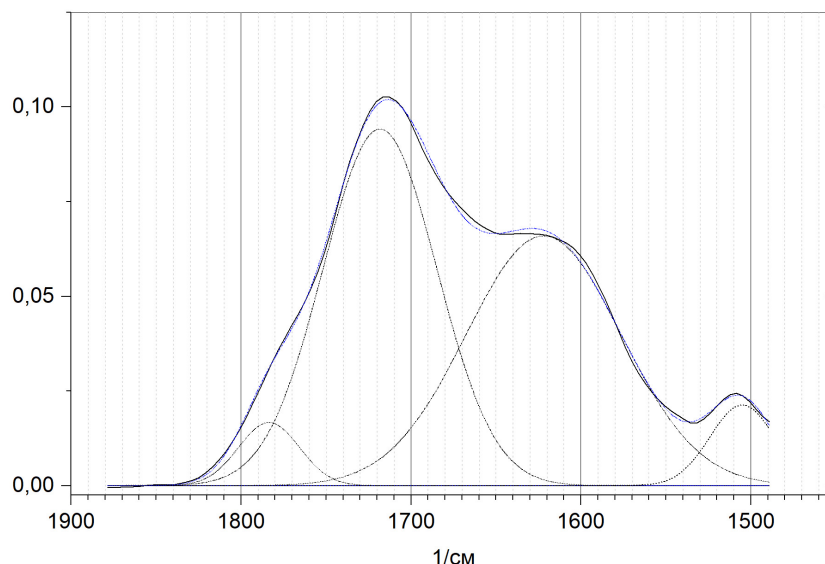


Рис. 5. Разложение участка спектра окисленного верхового торфа на составляющие полосы:
 — исходный спектр; --- кумулятивный спектр из составляющих

Fig. 5. Decomposition of the oxidized upland peat spectrum into component bands:
 — initial spectrum; --- cumulative spectrum of components

Для обоих торфов окислительная деструкция приводит к увеличению интенсивности полос поглощения валентных колебаний карбонильных групп кислот. В случае верхового торфа проявляется широкая полоса на 2600 см^{-1} димеров кислот. Также наблюдается уменьшение полос внеплоскостных деформационных колебаний $=\text{C}-\text{H}$ -групп на 1000–700 см^{-1} . Изменение интенсивности полосы поглощения свободных карбонильных групп торфов после окисления в большей степени происходит для низинного торфа, что может объясняться как образованием новых групп, так и удалением ионных связей с зольными элементами торфа.

Полученные данные позволяют предположить, что в процессе окислительной деструкции торфа происходят разрушение полисопряженных ароматических структур и образование продуктов с высоким содержанием кислородсодержащих групп.

На рис. 6 приведены электронные спектры поглощения ГК исходных торфов, водорастворимых продуктов окисления (ФПК) и ГК после окислительной деструкции осокового и пушицевого торфов. Навески высушенных вышеназванных продуктов растворяли в 0,1 н. растворе гидроксида натрия, концентрация составляла 0,02 %. Из данного рисунка видно, что все кривые сохраняют характерные для ГК особенности спектров поглощения. В то же время оптическая плотность ГК пушицевого торфа значительно выше, чем осокового. Причиной таких отличий является химический состав исходных растений-торфообразователей. Чем больше лигнина содержится в растениях-торфообразователях, тем больше ароматических структур участвует в построении молекул ГК [10].

Высокое значение величины оптической плотности ГК пушицевого торфа, свидетельствующее о значительном содержании полисопряженных структур в молекулах, можно объяснить условиями их образования. Кислая реакция среды верхового болота способствует гидролизу ГК, в результате которого происходят отщепление слабоокрашенных периферических цепей и конденсация отдельных фрагментов, что усиливает ароматический характер молекул ГК [8].

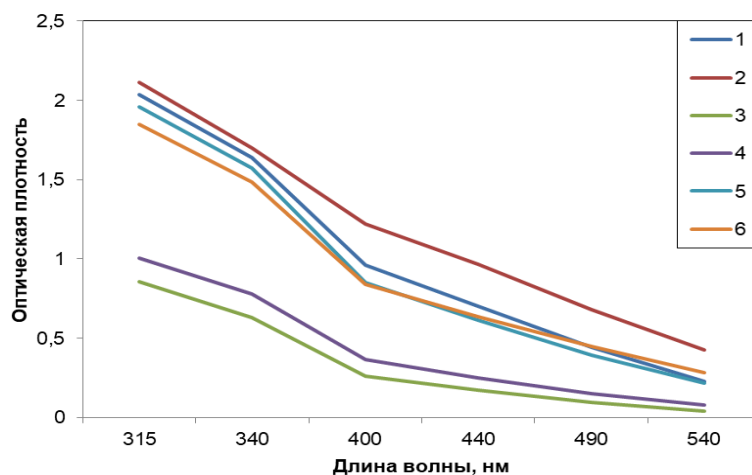


Рис. 6. Электронные спектры ГК и ФПК, концентрация 0,02 %:
 1 – ГК осокового торфа; 2 – ГК пушицевого торфа; 3 – ФПК осокового торфа;
 4 – ФПК пушицевого торфа; 5 – ГК остатка после выделения ФПК осокового торфа;
 6 – остатка после выделения ФПК пушицевого торфа

Fig. 6. Electronic spectra of HA and FLA, concentration 0.02%:
 1 – HA of sedge peat; 2 – HA of cottongrass peat; 3 – FLA of sedge peat;
 4 – FLA of cottongrass peat; 5 – HA of the residue after the extraction of FLA of sedge peat;
 6 – Residue after the extraction of FLA of cottongrass peat

Окисление молекул ГК пероксидом водорода приводит к резкому снижению оптической плотности их растворов. Так, значения величин оптических плотностей для ФПК значительно ниже, чем у исходных ГК во всей видимой области спектра. При длине волны 440 нм величина оптической плотности окисленных форм ГК по сравнению с таковой исходных ГК уменьшилась в 4,1 раза для осокового торфа и в 3,8 раза для пушицевого.

Оптическая плотность ГК после выделения ФПК занимает среднее положение. Светопоглощение макромолекул этих препаратов связано с устойчивыми хромофорами, незатронутыми в результате окислительной деструкции, при этом вклад систем полисопряжения в общее светопоглощение у этих веществ ниже, чем у исходных ГК, но выше, чем у ФПК (см. рис. 6).

Водорастворимые продукты, полученные в результате окислительной деструкции торфов, имеют небольшие величины оптической плотности при длине волны 440 нм – 0,17 и 0,25 для осокового и пушицевого торфов соответственно, что позволяет с большой вероятностью говорить о малой доле полисопряженных структур в их молекулах.

На рис. 7 и 8 представлены полученные гель-хроматограммы ГК и ФПК верхового и низинного торфа соответственно.

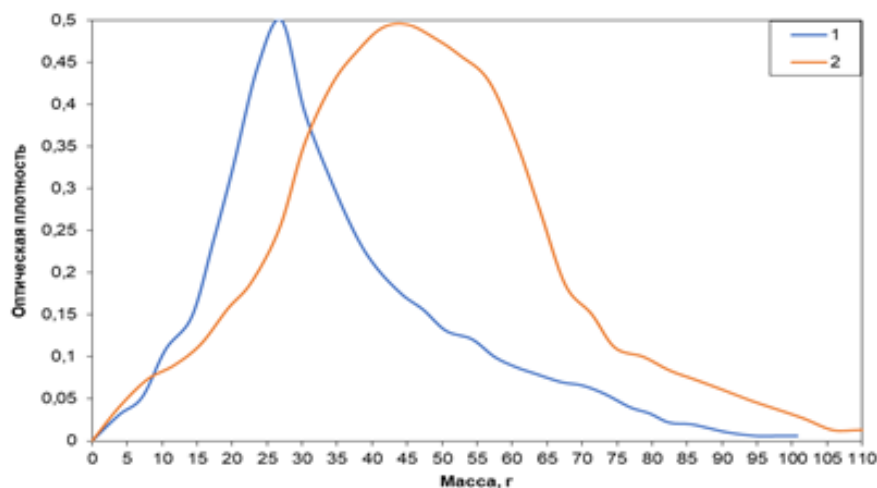


Рис. 7. Гель-хроматограмма полученных ФПК верхового торфа: 1 – ГК; 2 – ФПК

Fig. 7. Gel-chromatogram of the FLA of the upland peat: 1 – HA; 2 – FLA

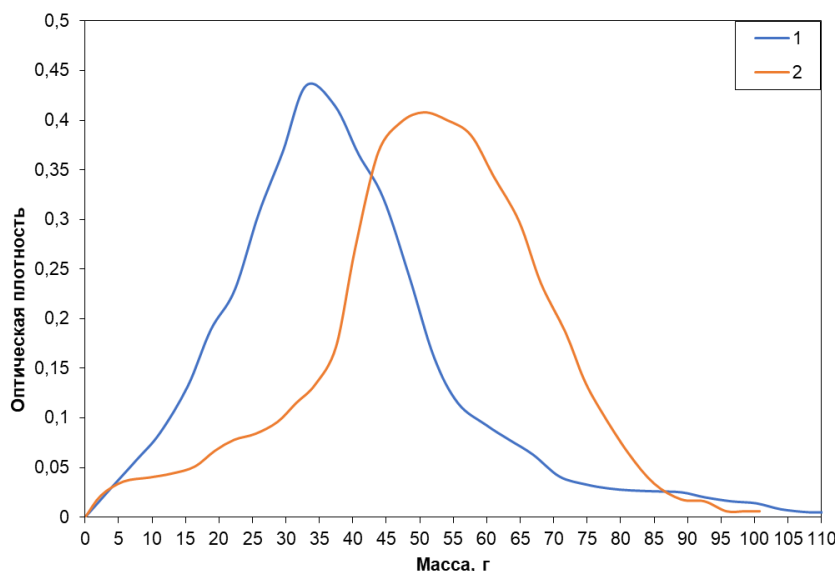


Рис. 8. Гель-хроматограмма полученных ФПК низинного торфа: 1 – ГК; 2 – ФПК

Fig. 8. Gel-chromatogram obtained by FLA of the lowland peat: 1 – HA; 2 – FLA

Данные, полученные в ходе расчетов с использованием гель-хроматограмм, приведены в табл. 4, из которой видно, что у всех исследованных объектов наблюдается значительное расхождение между среднemasсовой и среднечисловой молекулярными массами. Это может являться результатом различной степени проведения окислительной деструкции исходного сырья. Sephadex G-50 позволяет эффективно разделять ФПК, но для оценки ГК применим в меньшей степени, что связано с более высокой молекулярной массой последних. На основании полученных данных можно заключить, что обработка перекисными соединениями торфяного сырья различного происхождения приводит к снижению молекулярной массы и получению окисленных алифатических фрагментов.

Таблица 4. Молекулярные массы и полидисперсность образцов

Table 4. Molecular weights and polydispersity of samples

Образец	M_w , Да	M_n , Да	n
ГК верхового торфа	2119	379,18	5,58
ФПК верхового торфа	779,99	174,63	4,46
ГК низинного торфа	1169,33	231,77	5,04
ФПК низинного торфа	1102,82	200,78	5,49

Примечание: M_w – среднemasсовая молекулярная масса; M_n – среднечисловая молекулярная масса; n – полидисперсность образцов.

Заключение. Исследование элементного состава показало, что окислительная деструкция торфа приводит к уменьшению содержания углерода, увеличению водорода и обогащению препаратов кислородом. Так, отношение С : О для окисленных препаратов торфа падает по сравнению с исходными. Наиболее богаты кислородом водорастворимые продукты окислительной деструкции, отношение С : О для них значительно ниже, чем у исходных торфов, как и содержание в их составе углерода и водорода.

Данные ИК-спектроскопии исходных торфов (низинного и верхового) и продуктов их окисления пероксидом водорода свидетельствуют о том, что в процессе окислительной деструкции происходят разрушение полисопряженных ароматических структур и образование продуктов с высоким содержанием кислородсодержащих групп.

Деструкция молекул ГК пероксидом водорода приводит к снижению оптической плотности их растворов. Величина оптической плотности окисленных форм ГК при 440 нм по сравнению с таковой исходных ГК уменьшается в 4,1 раза для осокового торфа и в 3,8 раза для пушицевого.

Электронные спектры поглощения в видимой области ГК исходных торфов, водорастворимых продуктов окисления (ФПК) и ГК после окислительной деструкции осокового и пушицевого торфа показывают, что все кривые сохраняют характерные для ГК особенности спектров поглощения. В то же время значения величин оптических плотностей для ФПК значительно ниже, чем у исходных ГК во всей видимой области спектра. Оптические плотности ГК после выделения ФПК занимают среднее положение.

Водорастворимые продукты, полученные в результате окислительной деструкции торфов, имеют небольшие величины оптической плотности при длине волны 440 нм – 0,17 и 0,25 для осокового и пушицевого торфов соответственно, что свидетельствует о малой доле конденсированных полисопряженных структур в их молекулах.

Молекулярные массы экспериментальных препаратов составляют для ФПК верхового торфа 779,99 Да, низинного – 1102,82 Да, степень полидисперсности – 4,46 и 5,49 соответственно. Молекулярные массы исходных ГВ верхового торфа – 2119 Да, низинного – 1169,33 Да. Степень полидисперсности ГВ верхового торфа – 5,58, для низинного – 5,04. Процессы окислительной деструкции торфов приводят к уменьшению молекулярных масс макромолекул полученных ФК по сравнению с исходными ГК.

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 с.
2. Use of the ion exchange method for the determination of stability constants of trivalent metal complexes with humic and fulvic acids – part I: Eu^{3+} and Am^{3+} complexes in weakly acidic conditions / D. Wenming, Z. Hongxia, H. Meide, T. Zuyi // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2002. – Vol. 56. – P. 959–965.
3. Lanthanide-humic substances complexation. II. Calibration of humic ion-binding model V / J. E. Sonke // *Environmental Science & Technology*. – 2006. – Vol. 40. – P. 7481–7487.
4. Rare earth elements complexation with humic acid / O. Pourret, P. Davranche, G. Gruau, A. Dia // *Chemical Geology*. – 2007. – Vol. 243. – P. 128–141.
5. Усова, Т. Ю. Зарубежные технологии раздельного извлечения редкоземельных элементов / Т. Ю. Усова // *Редкие земли*. – 2018. – № 1 (9). – С. 137–148.
6. Получение фульвоподобных кислот методом окислительной деструкции торфа / В. М. Крайко, В. М. Дударчик, Е. В. Ануфриева, Е. Л. Дудникова // *Природопользование*. – 2025. – № 1. – С. 190–195.
7. Смычник, Т. П. Получение и свойства водорастворимых гуминовых препаратов из торфа : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07 / Смычник Татьяна Павловна. – Минск, 1992. – 175 с.
8. Лиштван И. И. Основные свойства торфа и методы его определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
9. Детерман, Г. Гель-хроматография / Г. Детерман. – М. : Мир, 1970. – 220 с.
10. Лукошко, Е. С. Диоксан-лигнин растений-торфообразователей / Е. С. Лукошко, Н. Н. Бамбалов, Л. А. Круковская // *Почвоведение*. – 1982. – № 2. – С. 40–44.

References

1. Volkov I. V. *Reakcii mikroelementov s guminovymi kislotami kak osnova sorbcionnoj dezaktivacii i ochistki technogennyh othodov*. Diss. kand. him. nauk [Reactions of trace elements with humic acids as a basis for sorption decontamination and purification of technological waste. PhD chem. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2016, 164 p. (in Russian)
2. Wenming D. Z., Hongxia H., Meide T., Zuyi T. Use of the ion exchange method for the determination of stability constants of trivalent metal complexes with humic and fulvic acids – part I: Eu^{3+} and Am^{3+} complexes in weakly acidic conditions. *Applied Radiation and Isotopes*, 2002, vol. 56, pp. 959–965.
3. Sonke J. E. Lanthanide-humic substances complexation. II. Calibration of humic ion-binding model V. *Environmental Science & Technology*, 2006, vol. 40, pp. 7481–7487.
4. Pourret O., Davranche P., Gruau G., Dia A. Rare earth elements complexation with humic acid. *Chemical Geology*, 2007, vol. 243, pp. 128–141.
5. Usova T. Yu. *Zarubezhnye tekhnologii razdel'nogo izvlecheniya redkozemel'nykh ehlementov* [Foreign technologies for separate extraction of rare earth elements]. *Redkie zemli = Rare Earths*, 2018, no. 1 (9), pp. 137–148. (in Russian)
6. Krajko V. M., Dudarchik V. M., Anufrieva E. V., Dudnikova E. L. *Poluchenie ful'vopodobnykh kislot metodom okislitel'noj destrukcii torfa* [Obtaining fulvic acids by oxidative destruction of peat]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 190–195. (in Russian)
7. Smychnik T. P. *Poluchenie i svoystva vodorastvorimyykh guminovykh preparatov iz torfa*. Diss. kand. tekhn. nauk [Production and properties of water-soluble humic preparations from peat. PhD tech. sci. diss.]. Minsk, 1992, 175 p. (in Russian)
8. 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)
9. Determan G. *Gel'-khromatografiya* [Gel chromatography]. Moscow, 1970, 220 p. (in Russian)
10. Lukoshko E. S., Bambalov N. N., Krukovskaya L. A., Smychnik T. P. *Dioksan-lignin rastenij-torfoobrazovatelej* [Dioxane-lignin of peat-forming plants]. *Pochvovedenie*, 1982, no. 2, pp. 40–44. (in Russian)

Информация об авторах

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

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

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

Ануфриева Елена Владимировна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru

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

Навоша Юлиан Юлианович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: navoscha@tut.by

Information about the authors

Valiantsina M. Kraiko – 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: vvkraiko@gmail.com

Vladimir M. Dudarchik – 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: dudwladm@gmail.com

Yuriy G. Yanuta – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Deputy Direktor, Head of Laboratory of physical and 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

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

Elizaveta Yu. Dorozhko – 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

Yulian Yu. Navosha – 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: navosha@tut.by

**ПАМЯТИ УЧЕНОГО
IN THE MEMORY OF A SCIENTIST**

**ПАМЯЦІ АКАДЭМІКА
РАДЗІМА ГАЎРЫЛАВІЧА ГАРЭЦКАГА
(07.12.1928–22.06.2025)**

**IN THE MEMORY OF ACADEMICIAN
RADZIM GAURYLAVICH GARETSKY
(07.12.1928–22.06.2025)**



22 чэрвеня 2025 г. пайшоў з жыцця Радзім Гаўрылавіч Гарэцкі – акадэмік Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, замежны член Расійскай акадэміі навук, доктар геалага-мінералагічных навук, прафесар, заслужаны дзяяч навукі, лаўрэат Дзяржаўнай прэміі СССР і Дзяржаўнай прэміі БССР, прэміі РАН імя акадэміка М. С. Шацкага і прэміі НАН Беларусі і Сібірскага аддзялення РАН імя акадэміка В. А. Капцюга.

Бацька Радзіма Гарэцкага Гаўрыла Іванавіч быў адным з заснавальнікаў Беларускай акадэміі навук. Маці Ларыса Восіпаўна Парфяновіч-Гарэцкая, вучоны-аграном, як і Гаўрыла Іванавіч, скончыла Ціміразеўскую сельскагаспадарчую акадэмію ў г. Маскве. У 1930 г. акадэмік Гаўрыла Гарэцкі, як і яго брат, вядомы пісьменнік Максім Гарэцкі, быў арыштаваны, што надоўга прадвызначыла вандроўнае жыццё сям'і за межамі Беларусі і нялёгкае дзяцінства Радзіма Гаўрылавіча. Яму давалося вучыцца ў 13 школах у розных гарадах і па-

сёлках. У 1947 г. юнак паступіў на геалагаразведчы факультэт Маскоўскага нафтавага інстытута імя І. М. Губкіна, а пасля заканчэння вучобы ў 1952 г. быў запрошаны А. Л. Яншыным на працу ў Геалагічны інстытут Акадэміі навук СССР (ГІН).

Ужо першыя даследаванні Р. Г. Гарэцкага ў Заходнім Казахстане і Сярэдняй Азіі пад кіраўніцтвам акадэмікаў М. С. Шацкага і А. Л. Яншына дазволілі вырашыць некаторыя важныя пытанні агульнай і рэгіянальнай тэктонікі, стратыграфіі, палеанталогіі, літалогіі, геалогіі нафтавых і газавых радовішчаў. Разам з акадэмікам А. Л. Яншыным Радзім Гаўрылавіч зрабіў грунтоўны ўнёсак у развіццё метадаў тэктанічных даследаванняў. Вынікі гэтых даследаванняў апублікаваны ў сумеснай фундаментальнай працы «Тектонический анализ мощностей» (1960), у якой насуперак пануючым уяўленням сцвярджаліся значнае пашырэнне ў геалагічным мінулым некампенсаванага прагінання, захаванасць старажытнага эразійнага рэльефу і глыбакаводных адкладаў.

1950–1960 гг. вызначыліся ў геалогіі сцвярджаннем парадэгмы новай глабальнай тэктонікі (тэктонікі пліт) і яе важнай часткі – вучэння аб маладых платформах. Р. Г. Гарэцкі асабліваю ўвагу надаў даследаванням маладых платформ. У 1969 г. ён атрымаў вучоную ступень доктара геалага-мінералагічных навук за працу «Тектоника молодых платформ Евразии», а ў 1972 г. выйшла яго манаграфія пад той жа назвай. У кнізе вылучаны асаблівае геалагічнай будовы і развіцця маладых платформ, як адметнай катэгорыі тэктанічных элементаў літасферы і ў якасці тэктонатыпу абрана Цэнтральна-Еўразійская платформа, а як тэктонатып маладых пліт – Туранская пліта. Даследаванне маладых платформ дазволіла выявіць тэктанічныя заканамернасці размяшчэння многіх карысных выкапняў, у тым ліку забяспечыла адкрыццё ў 1965 г. новага газаноснага раёна ў Прыараллі па рэкамендацыі Радзіма Гаўрылавіча і яго калег.

У гэты ж час Р. Г. Гарэцкі ўдзельнічаў ў рабоце па падрыхтоўцы матэрыялаў у некаторыя тамы «Геологии СССР». Асабліва складанай аказалася праца над ХХІ томам «Западный Казахстан». Разам з А. Л. Яншыным (рэдактар тома), В. С. Жураўлёвым, А. Е. Шлезінгерам, казахскімі геалагамі і іншымі калегамі ім ўпершыню была сістэматызавана ў дзвюх кнігах тома геалогія вялізнай тэрыторыі з разнастайнымі па геалагічнай будове раёнамі і пашыранымі ў іх пародамі ад дакембрыю да сучаснасці, з дадаткам «Геологическая карта Западного Казахстана. Масштаб 1 : 500 000» (1970).

Стварэнне тэктанічных карт займала важнае месца ў працы Радзіма Гаўрылавіча. У 1968–1975 гг. ён з’яўляўся намеснікам старшыні Рэдакцыйнай камісіі па апрабцы і зацвярджэнні геолога-геафізічных карт нафтагазаносных раёнаў тэрыторыі СССР (маштаб 1 : 1 000 000). За ўдзел у стварэнні «Тектонической карты Евразии» (маштаб 1 : 5 000 000) і манаграфію «Тектоника Евразии» яму разам з другімі вучонымі ГИНа на чале з А. Л. Яншыным у 1969 г. была прысуджана Дзяржаўная прэмія СССР.

За час працы ў ГИНе (1952–1971) у Р. Г. Гарэцкага ў поўнай меры выявіўся і развіўся талент вучонага і арганізатара. Працавітасць, звычка да напружанай работы, выдатныя веды па спецыяльнасці, адказнасць за давераную справу, добрасумленнасць і характар – лагодны ў адносінах з людзьмі, але цвёрды ў прынцыповых момантах – спрыялі поспехам і аўтарытэту ў калектыве.

У 1971 г. прэзідэнт АН БССР акадэмік М. А. Барысевіч запрасіў Р. Г. Гарэцкага на працу ў г. Мінск, у Інстытут геахіміі і геофізікі АН БССР, дзе ўжо працаваў яго бацька Гаўрыла Іванавіч Гарэцкі. У снежні гэтага ж года Радзім Гаўрылавіч вярнуўся на радзіму і ўзначаліў створаны ў інстытуце аддзел агульнай і рэгіянальнай тэктонікі. У хуткім часе Радзім Гаўрылавіч здолеў стаць прызнаным лідэрам тэктанічнай школы Беларусі і Прыбалтыкі, што выявілася і ў працы арганізаванай ім Камісіі па тэктоніцы Беларусі і Прыбалтыкі Міжведамаснага тэктанічнага камітэта СССР (1972–1991). У 1972 г. Р. Г. Гарэцкі быў абраны членам-карэспандэнтам АН БССР. Пад яго кіраўніцтвам разгарнулася праца па абагульненні велізарнага фактычнага матэрыялу па тэктоніцы, назапашанага геологамі па тэрыторыі Беларусі, Прыбалтыкі і заходніх абласцей Расіі. У выніку ў 1976 г. былі апублікаваны «Тэктанічная карта Беларусі і сумежных тэрыторый» (маштаб 1 : 500 000) і манаграфія «Тектоника Беларуси». У іх быў прапанаваны новы метады складання тэктанічных карт паводле раянавання тэрыторыі па ўзросце галоўнага этапу фарміравання платформаў структур. У манаграфіі ўпершыню апісаны будова і этапы развіцця структур фундамента і чыхла захаду СССР, вырашаны некаторыя актуальныя праблемы тэктонікі старажытных платформаў і тэктанічныя заканамернасці размяшчэння карысных выкапняў. За стварэнне «Тэктанічнай карты Беларусі і сумежных тэрыторый» і манаграфіі «Тектоника Беларуси» Радзім Гаўрылавіч з групай вучоных і геологаў-практыкаў у 1978 г. быў адзначаны Дзяржаўнай прэміяй БССР.

Новы этап у навукова-арганізацыйнай дзейнасці Р. Г. Гарэцкага пачаўся з 1977 г., калі яго абралі правадзейным членам (акадэмікам) АН БССР і ён быў прызначаны дырэктарам Інстытута геахіміі і геофізікі АН БССР, якім кіраваў 16 гадоў, пакуль не стаў віцэ-прэзідэнтам Акадэміі навук Беларусі.

Важнае месца ў дзейнасці Р. Г. Гарэцкага занялі тады сумесныя праекты з замежнымі геологамі, супрацоўніцтва з якімі ён распачаў яшчэ ў ГИНе з вывучэння палеазаідаў Еўразіі. Асабліва плённым такое супрацоўніцтва было ў 1975–1986 гг. па праекце № 86 Міжнароднай праграмы геалагічнай карэляцыі (МППК) «Усходне-Еўрапейская платформа (паўднёва-заходні край)». Распрацоўка гэтай актуальнай праблемы патрабавала сінтэзу геалагічных матэрыялаў аб будове і развіцці велізарнай тэрыторыі Еўропы ў межах амаль 20 краін і тэктанічных структур ад бартоў Балтыйскай сінеклізы, Беларускай антэклізы, Украінскага шчыта і Дабруджы на ўсходзе да варысцыйскіх збудаванняў Сярэдняй Еўропы і каледанід Англіі на захадзе, уключаючы акваторыю Паўночнага мора. Радзім Гаўрылавіч, з’яўляючыся адным з кіраўнікоў гэтага праекта, ўзначаліў даследаванні на тэрыторыі СССР і непасрэдна кіраваў тэктанічным напрамкам праекта. Адзін з асноўных вынікаў гэтай работы – складанне і выданне «Тэктанічнай карты паўднёва-заходняй ускраіны Усходне-Еўрапейскай платформы» (маштаб 1 : 1 500 000) (галоўны рэдактар Р. Г. Гарэцкі). Праведзеныя даследаванні далі магчымасць паглыбіць уяўленні аб тэктоніцы Еўропы і скласці комплекс літолага-палеагеаграфічных карт Заходняй і Цэнтральнай Еўропы.

Развіваючы вучэнне аб платформах, Р. Г. Гарэцкі асабліваю ўвагу надаваў галоўным структурам – аўлакагенам, сінеклізам, антэклізам, зонам перыкратонных апусканняў. У спецыяльных працах была выканана класіфікацыя сінекліз і антэкліз, раскрыты асаблівасці іх развіцця. Разам з С. В. Клушыным ён упершыню паказаў галоўную ролю лістрычных разломаў у будове і развіцці Прыпяцкага палеа-рыфта, а разам з іншымі калегамі – праблему лістрычнай тэктонікі платформаў наогул. Вялікае значэнне вучоны надаваў інтэрпрэтацыі геофізічных матэрыялаў, вывучэнню глыбіннай будовы і геадынамікі платформаў, іх сейсматэктанічнаму раянаванню. Вынікам гэтых мэтанакіраваных даследаванняў стала выданне пры ўдзеле і навуковым рэдагаванні Радзіма Гаўрылавіча шэрага манаграфій, сярод якіх «Тектоника Припятского прогиба» (1979), «Палеотектоника Белоруссии» (1983), «Геофлюидодинамика и нефтеобразование» (1997), «Геофизические поля и динамика тектоносферы» (2002) і інш.

Значныя практычныя вынікі даследавання маладых і старажытных платформаў палягаюць у высокай абгрунтаванасці на іх аснове навуковага прагнозу такіх карысных выкапняў, як нафта і газ, калійная і каменная солі, аалітавыя жалезныя руды, вуголле, падземныя пітныя воды і расолы і інш. У 1985 г. Р. Г. Гарэцкі быў узнагароджаны Прэзідыумам АН СССР прэміяй імя акадэміка М. С. Шацкага за серыю работ па тэме «Тектоника осадочного чехла платформенных областей Евразии». У 2004 г. разам з калектывам вучоных Беларусі і Сібіры ён стаў лаўрэатам прэміі імя акадэміка В. А. Капцюга, прысуджанай Сібірскім аддзяленнем РАН і НАН Беларусі.

Вывучэнне Прыпяцкага саяноснага басейна сумесна з В. З. Кіслікам, Э. А. Высоцкім, Н. С. Пятровай і іншымі спецыялістамі дазволіла раскрыць заканамернасці распаўсюджвання, будовы, складу

і ўтварэння дэвонскіх саялясных фармацый. Вынікі апублікаваны ў трох сумесных манаграфіях на гэту тэму, у тым ліку ў кнізе «Калиеносные бассейны мира» (1988).

З калектывам беларускіх геологаў Радзім Гаўрылавіч распрацаваў новае нафтагеалагічнае раянаванне Прыпяцкага прагіну і абгрунтаваў асноўныя напрамкі нафтапошукавых работ, звяртаючы ўвагу на важнасць сейсмастратыграфічных метадаў лакальнага і заналянага прагнозаў. Новыя метадычныя прыёмы пошукаў радовішчаў нафты, распрацаваныя ім з калегамі, былі абаронены пяццю аўтарскімі пасведчаннямі аб вынаходніцтве. Сумесна з геологамі-нафтавікамі Беларусі, Літвы, Украіны ён удзельнічаў у падрыхтоўцы і публікацыі фундаментальнай манаграфіі «Геология и нефтегазоносность запада Восточно-Европейской платформы» (1997).

У 1990-х гадах Р. Г. Гарэцкі з'яўляўся адным з лідэраў буйных навуковых міжнародных праектаў «Europrobe» і «Eurobridge», кіруючы савецкай, а пазней беларускай часткамі. Па тэрыторыі Беларусі быў праведзены геатрансект з дэталёвымі комплекснымі геолога-геафізічнымі даследаваннямі па двух профілях: Варэна – Нясвіж – Выступовічы і Бабруйск – Лельчыцы. Для выяўлення глыбіннай будовы асабліва важным было сейсмічнае і магніта-тэлурэчнае зандзіраванне. У выніку здабыты фундаментальныя веды аб структуры і эвалюцыі літасферы захаду Усходне-Еўрапейскай платформы.

Вывучэннем геалагічнай будовы зямной кары Беларусі і навакольнай тэрыторыі Радзім Гаўрылавіч працягваў займацца і да апошняга перыяду. У рэалізаваным праекце Геарыфт-2013 па напрамку Нясвіж – Брагін (Беларусь) – Чарнігаў – Палтава (Украіна) Р. Г. Гарэцкі ў складзе рабочай групы прымаў удзел у інтэрпрэтацыі атрыманых геофізічных вынікаў з тэктанічных пазіцый, што завяршылася стварэннем мадэлі глыбіннай будовы зямной кары да глыбіні 80 км. Гэта мадэль з'яўляецца асновай для вывучэння геалагічных асаблівасцей палеарыфтавых структур Усходне-Еўрапейскай платформы.

У 1993 г. Радзім Гаўрылавіч быў членам беларускай дэлегацыі на Генеральнай канферэнцыі ЮНЕСКА ў г. Парыжы, дзе выступіў з прапановай правесці даследаванне навейшай геадинамікі Цэнтральнай Еўропы ў сувязі з праблемай паходжання катлавіны Балтыйскага мора. Ідэя была падтрымана і набыла статус праекта МПГК № 346 «Неагеадинаміка дэпрэсіі Балтыйскага мора і сумежных абласцей», кіраўнікамі якога былі Р. Г. Гарэцкі, Э. А. Ляўкоў (Беларусь) і Г. Шваб (Германія). У выніку даследаванняў па праекце (1994–1998) геологамі Беларусі, Германіі, Даніі, Літвы, Латвіі, Польшчы, Украіны і Расіі была апублікавана серыя карт і высветлены асноўныя фактары неагеадинамічных працэсаў, што ўплывалі на развіццё тэрыторыі Цэнтральнай Еўропы; сярод іх і залажэнне ў сярэднім плейстацэне Усходне-Балтыйскай рыфтавай сістэмы трайнага сучлянення, фарміраванне якой прадаўжаецца і сёння. Вынікі даследаванняў былі падведзены ў манаграфіях «Неотектоника и неогеодинамика Восточно-Европейской платформы» (2009, разам з Р. Я. Айзбергам і А. К. Карабанавым) і «Сейсмотектоника плит древних платформ в области четвертичного оледенения» (2009, калектыў аўтараў).

Многія працы Радзіма Гаўрылавіча прысвечаны вывучэнню разломаў; ён прымаў актыўны ўдзел у напісанні манаграфіі «Разломы земной коры Беларуси» (2007) пад рэдакцыяй Р. Я. Айзберга. На падставе комплексных геолога-геафізічных даследаванняў Р. Г. Гарэцкім разам з Г. І. Каратаевым былі вылучаны новыя тэктанічныя элементы, якія апісаны ў кнізе «Новые тектонические элементы Восточно-Европейской платформы. Концепции, методы» (2012). Геалагічная інтэрпрэтацыя геофізічных палёў з прымяненнем сучасных метадаў мадэліравання паказалі, што Фенаскандынаўскі, Сармацкі і Волга-Уральскі сегменты, якія ўтвараюць Усходне-Еўрапейскі кратон, аб'яднаны элементам унікальнай структуры – Слабоцкім тэктана-геадинамічным вузлом трайнага сучлянення. Шырокі спектр асадкава-вулканогенных і інтрузійных фармацый у зонах сучлянення сегментаў зямной кары забяспечвае іх высокі металагенічны патэнцыял, з чым звязаны і перспектывы руданоснасці Цэнтральна-Беларускай шоўнай зоны і ўплыву яе на магчымую алмазаноснасць Беларусі (Р. Г. Гарэцкі, Г. І. Каратаев «Шовные зоны Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии», 2014).

Пастаянная ўвага Радзіма Гаўрылавіча да аэра- і космаінфармацыі як спосабаў вывучэння геалогіі, і асабліва тэктонікі, таксама дала плён: пад яго кіраўніцтвам у 1988 г. была складзена першая «Косматэктанічная карта Беларусі» (маштаб 1 : 2 000 000), а ў 2012 г. – новая карта (маштаб 1 : 500 000).

Навукова-арганізацыйная дзейнасць Р. Г. Гарэцкага як віцэ-прэзідэнта Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі прыпала на 1992–1997 гг. У гэты час развалу адзінай навуковай прасторы (пасля распаду СССР і станаўлення незалежнай дзяржавы – Беларусі) Радзім Гаўрылавіч разам з іншымі кіраўнікамі акадэміі рабіў усё магчымае для захавання кадраў вучоных і навуковых школ, далейшага развіцця беларускай навукі. Дзякуючы энергічным намаганням Р. Г. Гарэцкага ў Беларускім дзяржаўным універсітэце пасля 30-гадовага перапынку пачалася падрыхтоўка геологаў. Ён арганізаваў кафедру дынамічнай геалогіі і ў 1995–1997 гг. быў яе загадчыкам, чытаў лекцыі па агульнай геатэктоніцы і па праблемах асадкавых адкладаў Беларусі.

Пры рэарганізацыі НАН Беларусі, якая інтэнсіўна ішла ў 2004–2008 гг. і прывяла да закрыцця адзінай у Беларусі акадэмічнай геалагічнай установы – Інстытута геахіміі і геофізікі, Радзім Гаўрылавіч і яго паплечнікі па акадэміі намагаліся пераканаць кіраўніцтва ў неабходнасці захавання ў складзе

НАН Беларусі інстытута і развіцця фундаментальных даследаванняў у галіне геалагічных навук для забеспячэння развіцця мінеральна-сыравіннай базы і яе рацыянальнага выкарыстання. Глыбокі аналіз стану геалогіі ў краіне быў зроблены Р. Г. Гарэцкім у праграмным артыкуле «Проблемы геологического изучения недр Беларуси» (Літасфера, 2010, № 1 (39)).

Шмат увагі Радзім Гаўрылавіч заўсёды надаваў рэдактарскай дзейнасці, будучы членам рэдкалегіі часопіса РАН «Геотектоника», рэдакцыйнага савета міжнароднага часопіса «Геофизический журнал», рэдкалегіі «Геологічнага журналу» (Украіна) і іншых замежных выданняў. Як член рэдкалегіі ён удзельнічаў у падрыхтоўцы «Энцыклапедыі прыроды Беларусі» ў 5 тамах і 18-томнай «Беларускай энцыклапедыі». Р. Г. Гарэцкі з'яўляўся стваральнікам і галоўным рэдактарам (1994–2010 гг., да апошняга часу – членам рэдкалегіі) адзінага ў Беларусі навуковага геалагічнага часопіса «Літасфера», у якім на беларускай, рускай і англійскай мовах друкуюцца артыкулы па фундаментальных і прыкладных праблемах геалогіі, геафізікі, геахіміі, аб карысных выкапнях і іншая інфармацыя. Пад рэдакцыяй Радзіма Гаўрылавіча ці пры яго сумесным рэдагаванні з іншымі вучонымі выйшла з друку 140 найменняў навуковых выданняў.

Акадэмік Р. Г. Гарэцкі – выдатны вучоны шмат у якіх галінах геалогіі. Ён стаў аўтарам і суаўтарам 45 манаграфій і асобных выданняў, удзельнічаў у складанні, рэдагаванні і выданні 50 карт геалагічнага зместу, яго аўтарства пазначана ў больш за 500 навуковых артыкулах.

У Радзіма Гаўрылавіча многа вучняў: больш за 30 геалагаў і геафізікаў пад яго кіраўніцтвам ці пры яго кансультацыі абаранілі кандыдацкія і доктарскія дысертацыі. Ён быў апанентам амаль 50 дысертацый, больш за 20 з іх – доктарскія. Шмат гадоў Р. Г. Гарэцкі ўзначальваў вучоны савет па абароне кандыдацкіх і доктарскіх дысертацый па спецыяльнасцях «Агульная і рэгіянальная геалогія», «Геатэктоніка», «Геахімія», «Літалогія», «Геалогія нафты і газу».

У дзейнасці Радзіма Гаўрылавіча прыкметнае месца займала папулярызацыя геалагічных ведаў, ён стаў аўтарам шматлікіх брашур, артыкулаў, нарысаў і лекцый, сярод якіх ёсць прысвечаныя гісторыі геалогіі і асобным выдатным дзеячам навук аб Зямлі. Пра свайго навуковага настаўніка вучоны напісаў кнігу «Академик Яншин – дорогой мой учитель и друг» (2005).

За поспехі ў развіцці геалагічнай навукі Радзім Гаўрылавіч быў узнагароджаны ордэнам Працоўнага Чырвонага Сцяга, Ганаровымі граматамі Вярхоўнага Савета БССР і Прэзідыума НАН Беларусі, атрымаў дыпламы Гонару, залаты і іншыя медалі ВДНХ СССР і шмат іншых узнагарод.

Р. Г. Гарэцкі сумесна з Р. Я. Айзбергам, Я. Г. Грыбікам, Г. І. Каратаевым быў узнагароджаны дыпламам Топ-10 вынікаў дзейнасці вучоных Нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі ў галіне фундаментальных і прыкладных даследаванняў за 2018 г. за распрацоўку новых уяўленняў аб палеагеадынамічнай эвалюцыі глыбінных зон зямной кары і верхняй мантыі Прыпяцкага і Дняпроўскага палеарыфтавых нафтагазаносных басейнаў, якія дазваляюць павысіць эфектыўнасць геалагаразведных работ.

Асаблівае месца ў жыцці Радзіма Гаўрылавіча займалі праблемы адраджэння беларускай культуры і мовы, незалежнасці нашай краіны, прысутнасці беларусаў у свеце. Тым самым ён працягваў традыцыі выдатнейшых вучоных і асветнікаў: бацькі Гаўрылы Іванавіча і дзядзькі Максіма Іванавіча Гарэцкіх. З 1990 г. Р. Г. Гарэцкі стаў сябрам Рады, а ў 1993–2001 гг. з'яўляўся прэзідэнтам Згуртавання беларусаў свету «Бацькаўшчына», адным з арганізатараў шасці з'ездаў беларусаў свету. Ён быў сябрам Рады Таварыства беларускай мовы Беларускай інтэлігенцыі, Беларускага фонду культуры і іншых, натхняльнікам і арганізатарам штогадовых Чытанняў братоў Гарэцкіх. Радзім Гаўрылавіч выступаў як прафесійны пісьменнік (з 2004 г. – сябра пісьменніцкай арганізацыі), яго яру належаць кнігі пра трагічны лёс бацькі і дзядзькі («Ахвярую сваім “Я”», 1998; «Браты Гарэцкія», 2008; «Лісты жыцця і кахання», 2013), ён укладальнік і аўтар некалькіх асобных кніг пра Г. І. Гарэцкага («Акадэмік Гаўрыла Гарэцкі. Успаміны, артыкулы, дакументы. Да 100-годдзя з дня нараджэння» (2000); «Гаўрыла Гарэцкі. Выбранае» (2002); «Гавриил Иванович Горецкий» (у суаўтарстве, 2012) і інш.). Пісьменніку Р. Г. Гарэцкаму належыць вынаходніцтва арыгінальнага жанру мастацкай літаратуры, які звязаны з геалогіяй. У гэтым жанры выйшлі дзве кнігі – «Жыццёвы меланж» (2013) і «Апантаны Бацькаўшчынай. Жыццёвы меланж-2» (2018). Жанр мае назву менавіта «жыццёвы меланж». Як і стракатая горная парода меланж, народжаная ў стрэсавых сітуацыях пры зрухах зямной кары па разломах, так і жыццёвы меланж узнікае пры ўздзеянні чалавека на чалавека, адной супольнасці людзей на другую, краіны на краіну, прыродных феноменаў і іншых з'яў на жыццё людзей. Пазірк на гэтыя падзеі нашага знакамітага суайчынніка, вучонага, інтэлігента, чалавека высокай духоўнасці, адданага Бацькаўшчыне, – невычэрпная крыніца натхнення, веры і надзеі на шчаслівую будучыню Беларусі.

Р. Г. Гарэцкі да апошняга свайго часу плённа працаваў галоўным навуковым супрацоўнікам у лабараторыі геатэктонікі і геафізікі Інстытута прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Захопленасць навукай, арганізацыйны талент і высокія чалавечыя якасці прыцягвалі да Радзіма Гаўрылавіча ўсіх, хто яго ведаў і працаваў з ім. Гэтаму чалавеку былі ўласцівыя інтэлігентнасць, аптымізм і добразычлівасць, дэмакратызм, увага да калег, здольнасць бачыць галоўнае ў складаных

праблемах. Р. Г. Гарэцкі – выдатны вучоны і грамадскі дзеяч. Ён актыўна працаваў на карысць роднай краіны, працягваў і развіваў лепшыя традыцыі навукі і грамадскай думкі.

Беларускай геалогіі будзе вельмі не хапаць Радзіма Гаўрылавіча Гарэцкага – выдатнага даследчыка Зямлі, які вылучаўся шырокай эрудыцыяй, надзвычайнай працавітасцю, прынцыповасцю і патрабавальнасцю да сябе. Калегі і рэдкалегія часопіса «Природопользование» вельмі смуткуюць з нагоды зыходу с жыцця Радзіма Гаўрылавіча Гарэцкага – адданага сына зямлі беларускай.

***С. А. Лысенка, У. Ф. Логінаў, А. А. Махнач,
А. В. Кудзельскі, Я. Г. Грыбік, В. Г. Жогла,
Г. А. Камышэнка, Р. Э. Гірын, Т. Б. Рылова,
В. П. Зярніцкая, Я. А. Кухарык, В. І. Пашкевіч,
В. С. Хоміч, Л. П. Чыстая***

**ПАМЯТИ АКАДЕМИКА
АЛЕКСЕЯ ВАСИЛЬЕВИЧА МАТВЕЕВА
(23.05.1938–21.07.2025)**

*IN THE MEMORY OF ACADEMICIAN
ALEXEY VASILYEVICH MATVEYEV
(23.05.1938–21.07.2025)*

21 июля 2025 г. ушел из жизни известный белорусский ученый-геолог, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, лауреат Государственной премии БССР, доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик НАН Беларуси Алексей Васильевич Матвеев.

А. В. Матвеев родился 23 мая 1938 г. в г. Минске в семье служащих. После окончания географического факультета Белорусского государственного университета в 1960 г. Алексей Васильевич был направлен на работу в Белгипроводхоз Министерства мелиорации и водного хозяйства БССР. Основным направлением деятельности А. В. Матвеева было проведение инженерно-геологической съемки, что дало молодому специалисту возможность как приобрести большой практический опыт, так и обогатить знания в области четвертичной геологии.

В 1964 г. Алексей Васильевич поступил в очную аспирантуру Института геологических наук БССР, где обучался под научным руководством известного геолога-четвертичника, доктора геолого-минералогических наук М. М. Цапенко. А. В. Матвеев собрал и обобщил обширный материал по литологии и минералогии разновозрастных моренных отложений бассейна р. Березины и в 1966 г. досрочно защитил кандидатскую диссертацию на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. В течение последующих 10 лет Алексей Васильевич продолжил комплексное изучение отложений ледниковой формации Беларуси. Полученные научные результаты легли в основу защищенной им в 1975 г. докторской диссертации и опубликованной в 1976 г. фундаментальной монографии «Ледниковая формация антропогена Белоруссии».

С 1978 г. А. В. Матвеев работал в Институте геохимии и геофизики АН БССР, в стенах которого в 1980 г. по его инициативе была создана лаборатория динамики ландшафтов, в дальнейшем преобразованная в лабораторию современных геологических процессов. В это время научные интересы Алексея Васильевича значительно расширились и лежали в области геоморфологии, неотектоники, экологической геологии, минерагении четвертичных отложений; однако основным направлением исследований было изучение современной геодинамики территории Беларуси.

На протяжении 1980-х – первой половины 1990-х годов А. В. Матвеев формировал научную школу. Ряд молодых сотрудников защитили под его руководством кандидатские диссертации. В 1991 г. Алексею Васильевичу было присвоено ученое звание профессора. В это же время ученый единолично или в составе авторского коллектива опубликовал ряд обобщающих монографий, таких как «Неотектоника территории Припятского прогиба», «Рельеф Белорусского Полесья», «Неотектоника и полезные ископаемые Белорусского Полесья», «Рельеф Белоруссии», «История формирования рельефа Белоруссии», «Современная динамика рельефа Белоруссии». Научные результаты А. В. Матвеева получили высокую оценку. Так, в 1986 г. он в составе коллектива белорусских геологов стал лауреатом Государственной премии БССР в области науки и техники за разработку теоретических основ четвертичной геологии и внедрение их в практику геологоразведочных работ. В 1991 г. Алексей Васильевич был избран членом-корреспондентом, а в 1994 г. – академиком АН БССР. В 1993–1998 гг. он возглавлял Институт геологических наук НАН Беларуси.

На рубеже веков А. В. Матвеев продолжил исследования в области четвертичной геологии, геоморфологии и современной геодинамики территории Беларуси, участвовал в подготовке монографий «Геология Беларуси», «Основы геологии Беларуси», «Палеогеография кайнозоя Беларуси», «Линейные элементы территории Беларуси», трудился над составлением карт геологического содержания для Национального атласа Беларуси.



С 2008 г. Алексей Васильевич работал в должности главного научного сотрудника в лаборатории геодинамики и палеогеографии Института природопользования НАН Беларуси. В течение 2010–2020 гг. научные интересы А. В. Матвеева были сосредоточены на проблемах геохимии четвертичных отложений и оценке радоноопасности пород платформенного чехла и кристаллического фундамента территории Беларуси. Существенные результаты были получены им в области экологической геологии. Они были связаны с анализом и оценкой неблагоприятных последствий проявления современной геодинамики, определением их воздействия на степень комфортности геологической среды для жизнедеятельности населения.

Алексей Васильевич являлся членом редакционной коллегии журнала «Природопользование», а также таких рецензируемых изданий, как «Літасфера», «Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5. Біялогія. Навукі аб Зямлі».

Научное наследие А. В. Матвеева насчитывает более 450 опубликованных работ, в том числе около 30 монографий. Под его руководством подготовлено и защищено 3 докторских и более 10 кандидатских диссертаций.

В памяти и сердцах благодарных учеников, коллег и друзей Алексей Васильевич Матвеев навсегда останется веселым, доброжелательным и отзывчивым человеком, примером талантливого геолога-исследователя, мудрого и внимательного Учителя.

***Редколлегия журнала «Природопользование»,
коллектив лаборатории современной геодинамики
и палеогеографии Института природопользования
НАН Беларуси, друзья, коллеги***

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 подписные 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). Цитированная 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 (C², C₄) 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

№ 2, 2025

Редактор **Н. Т. Гавриленко**
Editor N. T. Gavrilenko

Компьютерная верстка **В. Г. Генералов**
Computer page making V. G. Generalov

Подписано в печать 30.12.2025.	<i>Signed into print 30.12.2025.</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. 22,1.	<i>Conditional printed sheets 22,1.</i>
Уч.-изд. л. 21,6.	<i>Conditional edited sheets 21,6.</i>
Тираж 50 экз.	<i>Circulation 50 copies.</i>
Заказ № 900.	<i>Order No. 900.</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>