

ISSN 2079-3928

Природо- пользование



2

2023

Государственное научное учреждение
«Институт природопользования
Национальной академии наук Беларуси»

Природопользование

2023. № 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*)
Томсон А. Э. – кандидат химических наук, доцент (*заместитель главного редактора*)
Высоченко А. В. – кандидат технических наук (*ответственный секретарь*)
Бровка Г. П. – доктор технических наук, доцент
Грибик Я. Г. – кандидат геолого-минералогических наук, доцент
Жогло В. Г. – доктор геолого-минералогических наук, доцент
Какарека С. В. – доктор технических наук, профессор
Камышенко Г. А. – кандидат технических наук, доцент
Курзо Б. В. – доктор технических наук, доцент
Кухарчик Т. И. – доктор географических наук, профессор
Логинов В. Ф. – академик, доктор географических наук, профессор
Матвеев А. В. – академик, доктор геолого-минералогических наук, профессор
Струк М. И. – кандидат географических наук, доцент

Международный редакционный совет

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

Адрес

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



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

Nature Management

2023. № 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*)
Aleksey Tomson – Ph. D. (Chemistry), Docent (*Associate Editor-in-Chief*)
Anna Vysochenko – Ph. D. (Technical) (*Executive Secretary*)
Gennadiy Brovka – D. Sc. (Technical), Docent
Yaroslav Gribik – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Docent
Vasiliy Zhoglo – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Docent
Sergey Kakareka – D. Sc. (Technical), Professor
Halina Kamyshenka – Ph. D. (Technical), Docent
Boris Kurzo – D. Sc. (Technical), Docent
Tamara Kukharchyk – D. Sc. (Geography), Professor
Vladimir Loginov – Academician, D. Sc. (Geography), Professor
Aleksey Matveev – Academician, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor
Mikhail Struk – Ph. D. (Geography), Docent

International Editorial Council

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

Address

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



СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

Логинов В. Ф., Микуцкий В. С. <i>Loginov V. F., Mikutsky V. S.</i>	Циркуляционные особенности формирования холодных и теплых зим в северном полушарии (на примере Беларуси) <i>The circulation features of the formation of cold and warm winters in the Northern Hemisphere (for the example of Belarus)</i>	5
Кравчук Л. А., Яновский А. А., Баженова Н. М. <i>Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M.</i>	Оценка влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности в различных геотехнических системах г. Могилева <i>Assessment of the influence of vegetation cover on the land surface temperature in main geotechnical systems of Mogilev city</i>	13
Круковская О. Ю., Какарека С. В. <i>Krukowskaya O. Yu., Kakareka S. S.</i>	Моделирование выбросов загрязняющих веществ автомобильного транспорта с высоким пространственным разрешением <i>Modeling road transport emissions of pollutants with high spatial resolution</i>	24
Ярмошук Т. Д. <i>Yarmoshuk T. D.</i>	Эмиссия парниковых газов с торфяного месторождения Выгонощанское на участке с преобладанием крапивы двудомной <i>Greenhouse gas emission from the Vygonoshchanskoe peat deposit at the site with a predominance of dioecious nettle</i>	39
Струк М. И., Живнач С. Г. <i>Struk M. I., Zhivnach S. G.</i>	Оценка биогенного загрязнения пригородных водоемов Вилейско-Минской водной системы <i>Assessment of biogenic pollution of the suburban reservoirs of Vileysko-Minskaya water system</i>	55
Суховило Н. Ю., Власова Д. Б., Новик А. А., Власов Б. П. <i>Sukhovilo N. Yu., Vlasova D. B., Novik A. A., Vlasov B. P.</i>	Динамика распространения водной растительности в acidотрофных озерах Беларуси <i>Dynamics of aquatic vegetation distribution in acidotrophic lakes of Belarus</i>	67
Романкевич Ю. А. <i>Ramankevich J. A.</i>	Распределение тяжелых металлов в донных отложениях прудов г. Несвижа <i>Distribution of heavy metals in bottom sediments of ponds of Nesvizh city</i>	84
Хомич В. С. <i>Khomich V. S.</i>	О методах изучения и оценки загрязнения почв в Беларуси <i>On the studying methods and assessment of soil pollution in Belarus</i>	98

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

Хибиев А. К., Шаблыко П. В., Сушкевич С. Л., Шеметило М. А. <i>Khibiyev A. K., Shablyka P. V., Sushkevich S. L., Shemiatsila M. A.</i>	Адаптация опыта геофизических исследований на геодинамических полигонах Беларуси для геологического изучения Земли Эндерби Восточной Антарктиды <i>Adaptation of geophysical research experiences at geodynamic polygons of Belarus for geological study of the Enderby Land of the East Antarctica</i>	107
--	--	-----

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

Бровка Г. П. <i>Brovka G. P.</i>	Развитие положений физико-химической механики мерзлых дисперсных сред и горных пород <i>Development of physical and chemical mechanics of frozen disperses media and rocks</i>	118
Навоша Ю. Ю., Ратникова О. Н., Агейчик И. В. <i>Navosha Yu. Yu., Ratnikova O. N., Ageichik I. V.</i>	Оценка современного состояния торфяных месторождений Витебской, Гродненской и Минской областей Беларуси на основе анализа спутниковых снимков <i>Assessment of the current state of the peat deposits of Vitebsk, Grodno and Minsk regions of Belarus based on the analysis of satellite images</i>	130

Томсон А. Э., Янута Ю. Г., Каменская Т. Н., Лукьянчик С. А., Соколова Т. В., Царюк Т. Я., Навоша Ю. Ю., Янута Г. Г., Марзан А. С. <i>Thomson A. E., Yanuta Yu. G., Kamenskaya T. N., Lukyanchik S. A., Sokolova T. V., Tsaryuk T. Ya., Navosha Yu. Yu., Yanuta G. G., Marzan A. S.</i>	Оценка бактериостатических и токсикологических свойств сорбционных материалов на основе торфа <i>Assessment of the bacteriostatic and toxicological properties of sorption materials based on peat</i>	141
Жмакова Н. А., Макарова Н. Л. <i>Zhmakova N. A., Makarova N. L.</i>	Полисахариды сфагновых мхов и сфагнового торфа малой степени разложения <i>Polysaccharides of sphagnum mosses and sphagnum peat with a low degree of decomposition</i>	150
Янута Ю. Г., Алейникова В. Н. <i>Yanuta Yu. G., Alejnikova V. N.</i>	Изменение состава и свойств гуминовых веществ при их последовательном извлечении из торфа и бурого угля <i>Change in content and properties of humic substances during their consistent extraction from peat and brown coal</i>	158

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ SCIENTIFIC REPORTS

Бондаренко Ю. В., Борисов А. А., Ботян Е. А., Кулевская Н. А., Французов Б. В., Чупрова Ю. Н. <i>Bondarenko Yu. V., Borisov A. A., Botyan E. A., Kulevskaya N. A., Chuprova Yu. N.</i>	Сравнительный анализ законодательства Российской Федерации и Республики Беларусь в области обращения с отходами <i>Comparative analysis of the legislation of the Russian Federation and the Republic of Belarus in the field of waste management</i>	166
---	--	-----

ЮБИЛЕИ JUBILEE

Акадэмік Радзім Гаўрылавіч Гарэцкі. Да 95-годдзя з дня нараджэння <i>Academician Radzim Gayrylavich Garetsky. To the 95th anniversary</i>	171
---	-----

ПАМЯТИ УЧЕНОГО MEMORY OF A SCIENTIST

Ромма Ефимович Айзберг (1933–2022). К 90-летию со дня рождения <i>Romma Efimovich Aizberg (1933–2022). To the 90th of the birth</i>	176
Иван Иванович Романенко (1943–2021). К 80-летию со дня рождения <i>Ivan Ivanovich Romanenko (1943–2021). To the 80th of the birth</i>	178

ХРОНИКА CHRONICS

VI Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов» <i>VI International scientific and practical conference "Actual problems of Earth sciences: cross-border studies"</i>	180
--	-----

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ
GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-5-12>
УДК 551.5+551.581.2+551.583.16

Поступила в редакцию 23.09.2023
Received 23.09.2023

**ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
ХОЛОДНЫХ И ТЕПЛЫХ ЗИМ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ
(НА ПРИМЕРЕ БЕЛАРУСИ)**

В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Упорядоченная долговременная адвекция воздуха из одних широтных и долготных зон в соседние является основным фактором возникновения продолжительных климатических аномалий. Обязательным условием при этом является устойчивость процессов общей циркуляции атмосферы.

Цель работы – установить связь атмосферного давления и климатических аномалий с использованием данных NCEP/NCAR Reanalysis 1 на изобарической поверхности 1000 гПа и дат суровых и теплых зим. В качестве показателя изменчивости геопотенциала использованы значения его среднеквадратических отклонений для каждого из зимних месяцев года. Исследованы отклонения геопотенциала в различных широтных и долготных зонах земного шара. На этой основе проведен анализ пространственно-временной изменчивости геопотенциала на изобарической поверхности 1000 гПа в зимние месяцы, а также определены имеющие ясный физический смысл максимальные градиенты геопотенциала 1000 гПа «субтропики – умеренные и субполярные широты» за период времени с 1949 по 2021 г., определяющие, по сути, интенсивность западного переноса воздушных масс в средних широтах и суровость зим в Атлантико-Европейском секторе Северного полушария.

Ключевые слова: западный перенос; геопотенциал; градиент геопотенциала; холодные и теплые зимы.

Для цитирования. Логинов В. Ф., Микуцкий В. С. Циркуляционные особенности формирования холодных и теплых зим в северном полушарии (на примере Беларуси) // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 5–12.

**THE CIRCULATION FEATURES OF THE FORMATION
OF COLD AND WARM WINTERS IN THE NORTHERN HEMISPHERE
(FOR THE EXAMPLE OF BELARUS)**

V. F. Loginov, V. S. Mikutsky

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

Abstract. Ordered long-term advection of air from one latitudinal and longitudinal zones to neighboring ones is the main factor in the occurrence of long-term climatic anomalies. A prerequisite for this is the stability of the processes of general atmospheric circulation.

The aim of the work is to establish the relationship between atmospheric pressure and climatic anomalies using NCEP/NCAR Reanalysis 1 data of geopotential values on an isobaric surface of 1000 hPa and dates of severe and warm winters. As an indicator of geopotential variability, the values of standard deviations of geopotential values for each of the winter months of the year were used.

The emphasis in the work is on studying these changes in geopotential deviations in various latitudinal and longitudinal zones. On this basis, an analysis of the spatiotemporal variability of the geopotential on the isobaric surface of 1000 hPa in the winter months was carried out, and the maximum gradients of the geopotential 1000 hPa 'subtropics – temperate and subpolar latitudes' were determined for the period from 1949 to 2021. These gradients have a clear physical meaning and determine, in fact, the intensity of westerly transport of air masses in mid-latitudes and the severity of winters in the Atlantic-European sector of the Northern Hemisphere.

Keywords: westerly transport; geopotential; geopotential gradient; cold and warm winters.

For citation. Loginov V. F., Mikutsky V. S. The circulation features of the formation of cold and warm winters in the Northern Hemisphere (for the example of Belarus). *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 5–12.

Введение. Основные особенности барического поля и планетарной циркуляции (ООПЦ) состоят в следующем.

Трехволновая система барического поля и атмосферной циркуляции в атмосфере хорошо отслеживается на картах радиационного баланса и облачности. Это способствует формированию трех синоптических районов в системе общей циркуляции атмосферы (ОЦА) в умеренных широтах: атлантико-европейского, азиатского и американского. Такая структура ОЦА приводит к формированию в умеренных широтах шести районов крупных аномалий гидрометеорологических характеристик, совпадающих с тремя гребнями и тремя ложбинами распределения давления в тропосфере [1]. Региональные особенности изменений климата зависят от долготного положения высотных ложбин и гребней и их устойчивости, а также морфометрических характеристик (широты, долготы, интенсивности центров действия атмосферы). Для атлантико-европейского синоптического района большое значение имеют морфометрические характеристики Исландского минимума и Азорского максимума атмосферного давления.

Установлено, что только устойчивые в пространстве ООПЦ, даже при их слабом развитии, приводят к крупным климатическим эффектам, вызывая продолжительную во времени упорядоченную адвекцию воздуха из одних широтных и долготных зон в соседние, а также большие изменения радиационного режима при продолжительном стационарировании барических образований.

Резкое понижение температуры воздуха зимой (суровые зимы) наблюдается в районах расположения высотных ложбин при их углублении. Этому способствует ослабление западного потока в высоких широтах и смещение западных ветров к экватору. Как следствие, происходит блокирование широтного перемещения воздушных масс в результате развития длинных стационарных волн в западном переносе.

Слабое развитие высотных гребней и ложбин в умеренных широтах улучшает обмен воздушных масс между океаническими и континентальными регионами и приводит к режиму, характерному для теплых зимних периодов, а также периодов хорошего увлажнения континентальных регионов в летний период.

Цели и задачи, методы. Описанные во введении устойчивые в пространстве особенности барического поля запускают механизм переноса воздушных масс в атмосфере, имеющего определяющую роль в возникновении климатических аномалий, в частности холодных и теплых зим на территории Беларуси. Цель работы – установить количественные характеристики таких связей на основе анализа данных NCEP/NCAR Reanalysis 1 значений геопотенциала на изобарической поверхности 1000 гПа. В качестве показателя изменчивости давления использованы значения среднеквадратических отклонений значений геопотенциала в зимние месяцы – одной из важных характеристик изменчивости параметров ОЦА, которая определяет повторяемость холодных и теплых зим.

Причины формирования холодных и теплых зим в Европейском секторе и на территории Беларуси рассматривались ранее [2, 3]. Особенностью данной работы является изучение указанных изменений отклонений геопотенциала в различных широтных и долготных зонах. На этой основе становится возможным провести анализ пространственной неустойчивости климата в различных регионах земного шара, а также определить максимальные градиенты геопотенциала 1000 гПа «субтропики – умеренные и субполярные широты» за период времени с 1949 по 2021 г., определяющие, по сути, интенсивность западного переноса воздушных масс в средних широтах и суровость зим в Атлантико-Европейском секторе Северного полушария.

Результаты исследований. В качестве показателя изменчивости геопотенциала вычислены значения среднеквадратических отклонений геопотенциала на поверхности 1000 гПа в широтном и долготном направлениях в зимние месяцы года в Северном и Южном полушариях (80° с. ш. – 80° ю. ш.). При расчетах использованы данные проекта NCEP/NCAR Reanalysis 1 [4] по значениям геопотенциала, предоставляемые лабораторией физических наук Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA PSL) [5], при разрешении градусной сетки $5^\circ \times 10^\circ$ по широте и долготе соответственно.

Пространственный анализ неустойчивости климата. На рис. 1 представлены стандартные отклонения геопотенциала 1000 гПа вдоль долготных и широтных кругов за период с 1949 по 2019 г. Наиболее яркой особенностью изменения среднеквадратического отклонения в широтном направлении является максимум в Северном полушарии, приходящийся на широтный пояс 45° – 65° с. ш. Значения среднеквадратических отклонений в широтном поясе 15° – 30° с. ш. несколько больше в последние месяцы зимы (январь – февраль), что вполне объяснимо.

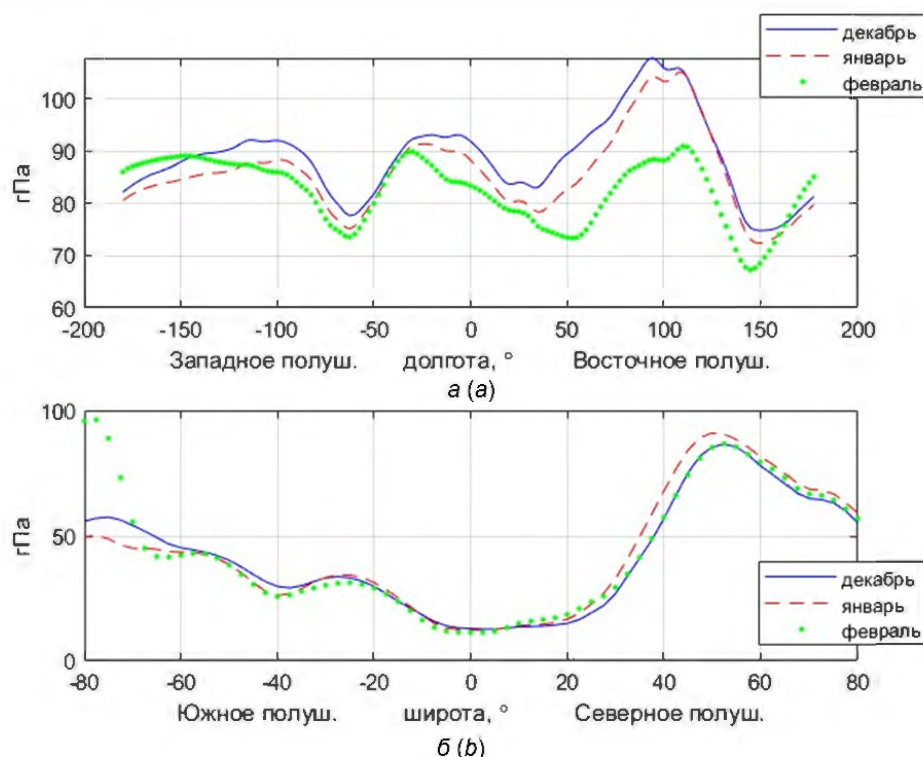


Рис. 1. Стандартное отклонение геопотенциала на поверхности 1000 гПа вдоль долготных (а) и широтных (б) кругов для зимних месяцев 1949–2021 гг.

Fig 1. Standard deviation of geopotential on the surface of 1000 hPa along longitudinal (a) and latitudinal (b) circles for the winter months of 1949–2021

В океаническом Южном полушарии в указанное время года наблюдается лето и, как следствие, отмечаются два слабо выраженных максимума в изменении геопотенциала, приходящиеся на субтропический максимум атмосферного давления вблизи 30° ю. ш. и второй слабый максимум в умеренных широтах в широтном поясе вблизи 50° ю. ш. Минимальные значения среднеквадратического отклонения геопотенциала приходятся на широтный пояс 5° ю. ш.– 20° с. ш.

Представленные на рис. 2 и 3 пространственные изменения среднеквадратических отклонений для различных широтных и долготных зон несколько отличаются для восьми холодных и восьми теплых зим.

Изменения геопотенциала 1000 гПа в зависимости от широты характеризуются максимальными значениями среднеквадратических отклонений в континентальных районах (долготный пояс 80° – 120° в. д.), что объяснимо большей континентальностью пояса. Наибольший рост значений среднеквадратических отклонений наблюдается на границе естественного синоптического района, выделенного еще в начале прошлого столетия Б. П. Мультановским (110° в. д.) [6].

Различия среднеквадратических отклонений температуры особенно заметны в феврале месяце: над Северо-Американским континентом среднеквадратические отклонения температуры минимальны для холодных зим, тогда как для теплых зим, наоборот, они максимальны. Подобная ситуация складывается на востоке Атлантического сектора (45° – 0° з. д.) и над Европейским сектором (0° – 60° в. д.): среднеквадратические отклонения температуры минимальны в этих секторах в случае холодных зим и повышены в случае теплых зим.

В Южном полушарии небольшой максимум отмечается в долготном поясе 0° – 40° з. д., особенно в январе (лето Южного полушария). Этот долготный пояс приходится на Южную Атлантику, где формируются Южное и Северное пассатные течения.

В теплые зимы максимум в изменчивости геопотенциала размыт и его средняя широта смещается в северном направлении, что подтверждает вывод о смещении путей циклонов в более высокие широты при потеплении климата (рис. 2).

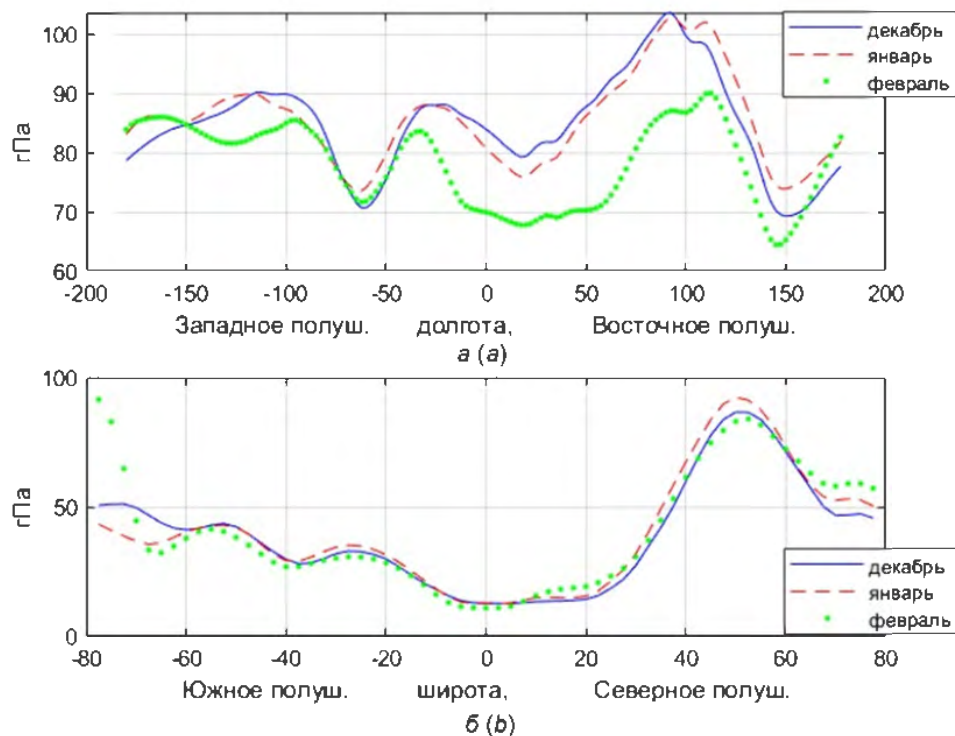


Рис. 2. Стандартное отклонение геопотенциала на поверхности AT_{1000} вдоль долготных (а) и широтных (б) кругов для восьми самых холодных зим на территории Беларуси

Fig. 2. Standard deviation of geopotential on the surface of AT_{1000} along longitudinal (a) and latitudinal (b) circles for the eight coldest winters on the territory of Belarus

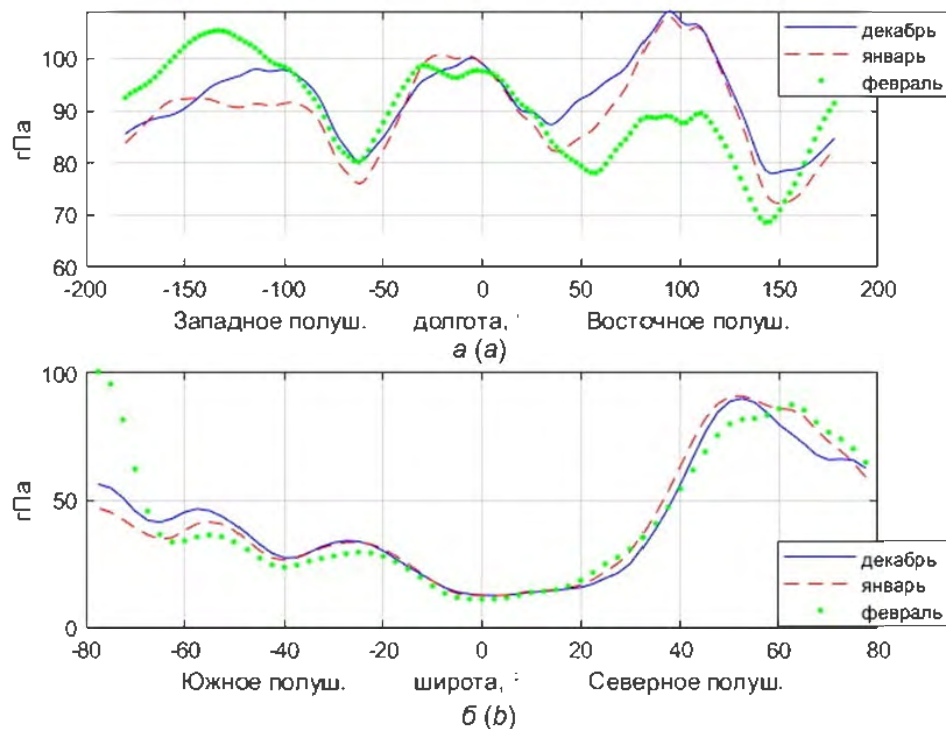


Рис. 3. Стандартное отклонение геопотенциала на поверхности 1000 гПа вдоль долготных (а) и широтных (б) кругов для восьми самых теплых зим на территории Беларуси

Fig. 3. Standard deviation of geopotential on the surface of 1000 hPa along longitudinal (a) and latitudinal (b) circles for the eight warmest winters on the territory of Belarus

Некоторые различия среднеквадратических отклонений геопотенциала 1000 гПа для разных месяцев зимнего времени года отмечаются для высоких широт Северного и Южного полушарий ($\varphi \geq 60^\circ$ с. ш. и $\varphi \geq 60^\circ$ ю. ш.). В частности, большая изменчивость температуры обнаруживается в случае теплых зим в Северном полушарии. Это особенно заметно для второй половины зимы (январь – февраль). Среднеквадратические же отклонения геопотенциала 1000 гПа в феврале существенно меньше по величине в долготных поясах 40° з. д. – 110° в. д. и 40° в. д. – 140° в. д. для холодных и теплых зим соответственно, то есть в первом и частично втором (в восточной его части) Евразийских синоптических районах Б. П. Мультановского.

Генеральной особенностью пространственного распределения значений стандартного отклонения по широте является наличие ярко выраженных трех максимумов в следующих долготных поясах: 140° – 90° з. д., 35° з. д. – 10° в. д. и 80° – 115° в. д., на который приходится самый мощный максимум изменчивости геопотенциала как для теплых, так и для холодных зим. Общая картина в целом сохраняется и для всего доступного ряда значений геопотенциала (1949–2021 гг.; см. рис. 1): ярко выраженная изменчивость геопотенциала остается в районе Сибирского максимума (80° – 115° в. д.); менее выражен максимум в восточной части Атлантического океана (45° – 10° з. д.) и размытый максимум наблюдается в долготном поясе 160° – 90° з. д. во второй половине зимы (январь – февраль) (см. рис. 1).

Особенности изменений среднеквадратического отклонения геопотенциала 1000 гПа характеризуют пространственную нестабильность климата в различных регионах земного шара. В частности, выше было показано, что самой высокой нестабильностью отличается климат широтного пояса 50° – 65° с. ш. Северного полушария в зимнее время года.

Определение долготного интервала максимальных градиентов геопотенциала 1000 гПа «субтропики – умеренные и субполярные широты». Для указанной цели был осуществлен поиск областей с максимальными значениями отрицательной корреляции геопотенциала 1000 гПа в субтропиках с геопотенциалом 1000 гПа в умеренных и субполярных широтах. Анализ показал, что наиболее сильные отрицательные корреляции значений геопотенциала 1000 гПа существуют между районами, ограниченными следующими координатами: $27,5^\circ$ – $37,5^\circ$ с. ш., 10° з. д. – $2,5^\circ$ в. д. и 65° с. ш. – 75° с. ш., 5° з. д. – $7,5^\circ$ в. д. Для указанных сферических широтно-долготных прямоугольников [7] в субтропических и субполярных широтах характерен максимальный градиент геопотенциала 1000 гПа за период времени с 1949 по 2021 г. Указанный градиент имеет ясный физический смысл и, собственно и определяет интенсивность западного переноса воздушных масс в средних широтах. В многочисленных работах показана связь между интенсивностью западного переноса воздушных масс и суровостью зим в Атлантико-Европейском секторе Северного полушария [1, 4].

Значения разности геопотенциала ΔT_{1000} в названных выше прямоугольниках для каждого месяца зимнего сезона за период с 1949 по 2021 г. представлены на рис. 4, из которого следует, что наибольшие значения разностей геопотенциала ΔT_{1000} наблюдаются с середины 1970-х годов в декабре и январе. В феврале рост потенциала ΔT_{1000} отмечается только с конца 1980-х годов, то есть на 15–17 лет позже.

Средние величины градиентов геопотенциала оказались наименьшими в первые 25–35 лет, а наибольшими в середине ряда (1974–1999 гг.). В последние два десятилетия средние значения градиентов геопотенциала субтропических и умеренных широт несколько уменьшились по сравнению с предыдущим периодом. Подобная структура временной изменчивости характерна и для индекса Северо-Атлантического колебания (САК), что вполне естественно, поскольку принципы вычисления этих двух показателей атмосферной циркуляции весьма близки.

Градиенты геопотенциала на барической поверхности 1000 гПа для выделенных прямоугольников в субтропических и субполярных широтах в случае холодных и теплых зим приведены в табл. 1, из которой следует, что градиенты геопотенциала на поверхности ΔT_{1000} для выделенных широтно-долготных прямоугольников в случае теплых зим в среднем более, чем в 3 раза превышают градиенты геопотенциала в случае холодных зим (различие средних величин указанных градиентов составляет 153). Особенно большие различия величин градиентов геопотенциала характерны для января ($\Delta = 186$).

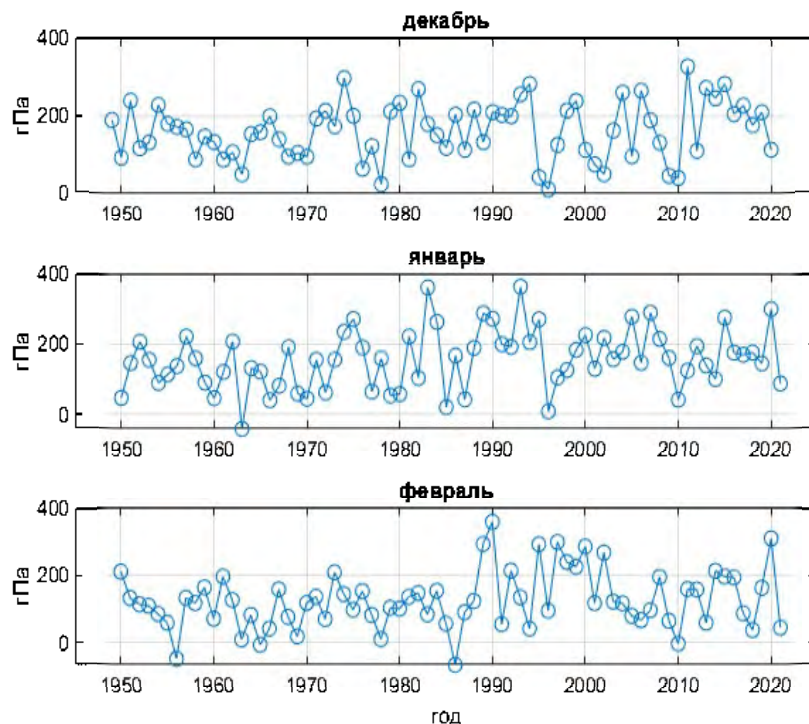


Рис. 4. Градиент геопотенциалов на поверхности AT_{1000} для выделенных широтно-долготных прямоугольников субтропических и умеренных широт в зимний период (1949–2021 гг.)

Fig. 4. Geopotential gradient on the AT_{1000} surface for selected latitude-longitude rectangles of subtropical and temperate latitudes in winter (1949–2021)

Таблица 1. Градиент геопотенциалов на поверхности AT_{1000} для выделенных широтно-долготных прямоугольников в субтропических и субполярных зонах в случае холодных и теплых зим

Table 1. Geopotential gradient on the AT_{1000} surface for selected latitude-longitude rectangles in subtropical and subpolar zones in the case of cold and warm winters

Холодный зимний сезон	Декабрь (XII)	Январь (I)	Февраль (II)	Зима
1953–1954 гг.	131	90	84	102
1962–1963 гг.	106	-40	9	25
1967–1968 гг.	139	191	75	135
1968–1969 гг.	95	60	18	57
1969–1970 гг.	104	45	117	89
1978–1979 гг.	24	54	102	60
1984–1985 гг.	150	21	56	75
1995–1996 гг.	42	9	94	49
Среднее значение	99	54	69	74
Теплый зимний сезон	Декабрь (XII)	Январь (I)	Февраль (II)	Зима
1960–1961 гг.	132	121	195	149
1974–1975 гг.	296	271	97	221
1988–1989 гг.	215	288	291	265
1989–1990 гг.	132	272	357	253
2007–2008 гг.	188	193	199	
2014–2015 гг.	244	275	195	238
2015–2016 гг.	281	176	192	216
2019–2020 гг.	208	299	308	272
Среднее значение	212	240	228	227

Аномалии (стандартизированные отклонения) геопотенциала на уровне барической поверхности 1000 гПа в выделенных прямоугольниках в субтропических и субполярных широтах для случаев холодных и теплых зим за период с 1949 по 2021 г. приведены в табл. 2, из которой видно, что в подавляющем числе зимних месяцев в случае холодных и теплых зим наблюдаются аномалии геопотенциала разного знака.

Таблица 2. Аномалии геопотенциала AT_{1000} в выделенных выше субтропических и субполярных широтах для холодных и теплых зим

Table 2. Anomalies of the AT_{1000} geopotential in the subtropical and subpolar latitudes identified above for cold and warm winters

Холодный зимний сезон	Декабрь (XII)	Январь (I)	Февраль (II)	Теплый зимний сезон	Декабрь (XII)	Январь (I)	Февраль (II)
<i>Субполярные широты</i>							
1953–1954 гг.	0,11	0,95	0,26	1960–1961 гг.	–0,10	0,53	–0,39
1962–1963 гг.	0,67	2,16	1,11	1974–1975 гг.	–1,60	–1,39	0,34
1967–1968 гг.	0,35	–0,23	0,28	1988–1989 гг.	–0,35	–1,30	–1,94
1968–1969 гг.	0,65	1,07	0,68	1989–1990 гг.	–0,04	–1,32	–2,83
1969–1970 гг.	0,76	1,08	0,34	2007–2008 гг.	–0,10	–0,45	–0,70
1978–1979 гг.	2,00	0,83	0,11	2014–2015 гг.	–0,95	–1,32	–1,12
1984–1985 гг.	0,37	1,50	1,00	–	–	–	–
1995–1996 гг.	1,65	1,24	0,29	–	–	–	–
<i>Субтропические широты</i>							
1953–1954 гг.	–0,82	–0,23	–0,83	1960–1961 гг.	–1,27	–0,09	1,59
1962–1963 гг.	–0,61	–2,06	–1,53	1974–1975 гг.	1,47	0,88	–0,11
1967–1968 гг.	–0,11	0,66	–1,53	1988–1989 гг.	1,20	1,66	1,27
1968–1969 гг.	–1,01	–1,04	–2,30	1989–1990 гг.	–1,08	1,03	1,45
1969–1970 гг.	–0,46	–1,48	0,42	2007–2008 гг.	0,75	1,01	0,79
1978–1979 гг.	–0,73	–1,74	–0,48	2014–2015 гг.	1,02	1,17	–0,23
1984–1985 гг.	0,34	–1,40	–0,03	–	–	–	–
1995–1996 гг.	–0,77	–2,32	–0,43	–	–	–	–

Примечание: – холодные зимы; – теплые зимы.

Из табл. 2 следует, что для восьми холодных зим аномалии геопотенциала AT_{1000} в субполярных широтах во всех случаях, кроме одного (январь 1968 г.), положительные, что свидетельствует о снижении интенсивности западного переноса воздушных масс, то есть интенсивности переноса теплого и влажного воздуха с Атлантики. Для теплых зим в субполярных широтах наблюдаются преимущественно отрицательные аномалии AT_{1000} (доля положительных составляет лишь 11 %). Такое распределение геопотенциала приводит к усилению градиента AT_{1000} субтропических и субполярных широт, интенсификации западного переноса и формированию теплых зим на территории Беларуси.

В субтропиках общая картина знака аномалий геопотенциала 1000 гПа для холодных и теплых зим меняется на противоположную. Отрицательные аномалии геопотенциала в случае холодных зим (их доля составляет 88 %) приводят к ослаблению градиента геопотенциала AT_{1000} , что снижает интенсивность западного переноса теплых воздушных масс с Атлантики.

В случае формирования теплых зим в Беларуси знак аномалий AT_{1000} в субтропиках остается в большинстве случаев положительным, число противоположных по знаку аномалий AT_{1000} составляет только 28 %. Это свидетельствует о том, что роль субполярных широт в формировании величины и знака градиента AT_{1000} «субтропики – субполярные широты» и, как следствие, интенсивности западного переноса воздушных масс и суровости зим в Беларуси более существенная, чем субтропических широт.

Выводы.

1. Показано, что самой высокой нестабильностью отличается геопотенциал в широтном поясе 50–65° с. ш. Северного полушария в зимнее время года.

2. Определены области с наиболее тесными отрицательными связями значений геопотенциала 1000 гПа «субтропики – субполярные широты». Оказалось, что наиболее тесные отрицательные корреляции значений геопотенциала 1000 гПа существуют между районами, ограниченными следующими координатами: 27,5°–37,5° с. ш., 10° з. д. – 2,5° в. д. и 65°–75° с. ш., 5° з. д. – 7,5° в. д. Сравнительный анализ указанных градиентов геопотенциала на поверхности AT_{1000} выявил, что в случае теплых

зим в Беларуси эти градиенты в среднем более чем в 3 раза превышают градиенты в случае холодных зим; наибольшие различия величин градиентов геопотенциала при этом характерны для января.

3. Показано, что роль субполярных широт в формировании величины и знака градиента AT_{1000} «субтропики – субполярные широты» и, как следствие, интенсивности западного переноса воздушных масс и суровости зим в Беларуси более существенная, чем субтропических широт.

Список использованных источников

1. Сазонов, Б. И. Суровые зимы и засухи / Б. И. Сазонов. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 240 с.
2. Логинов, В. Ф. Повторяемость и возможные причины формирования холодных и теплых зим на территории Беларуси за период инструментальных наблюдений / В. Ф. Логинов // Природные ресурсы. – 2010. – № 2. – С. 121–124.
3. Логинов, В. Ф. Причины формирования холодных и теплых зим в Европейском секторе и на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, Ю. А. Бровка // Гидрометеорология и образование. – 2022. – № 3. – С. 10–21.
4. The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project / E. Kalnay [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 1996. – Vol. 77, iss. 3. – P. 437–471. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2
5. NOAA Physical Sciences Laboratory [Electronic resource]. – Mode of access: <https://psl.noaa.gov>. – Date of access: 28.03.2023.
6. Климатические аномалии, их диагностика и прогнозирование / Е. П. Борисенков, В. Ф. Логинов [и др.] // Обзор ВНИИГМИ-МЦД, сер. Метеорология. – Обнинск, 1988. – Вып. 6. – 62 с.
7. Груза, Г. В. О пространственном осреднении в задачах мониторинга климата / Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова, В. Д. Смирнов // Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем. – 2013. – Т. 25. – С. 42–70.

References

1. Sazonov B. I. *Surovyye zimy i zasukhi* [Severe winters and droughts]. Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1991, 240 p. (in Russian)
2. Loginov V. F. *Povtoryayemost' i vozmozhnnyye prichiny formirovaniya kholodnykh i teplykh zim na territorii Belarusi za period instrumental'nykh nablyudeniy* [Repeatability and possible causes of the formation of cold and warm winters on the territory of Belarus during the period of instrumental observations]. *Prirodnyye resursy = Natural Resources*, 2010, no. 2, pp. 121–124. (in Russian)
3. Loginov V. F., Brovka Yu. A. *Prichiny formirovaniya kholodnykh i teplykh zim v Yevropeyskom sektore i na territorii Belarusi* [Reasons for the formation of cold and warm winters in the European sector and on the territory of Belarus]. *Gidrometeorologiya i obrazovaniye = Hydrometeorology and Education*, 2022, no. 3, pp. 10–21. (in Russian)
4. Kalnay E., et al. The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, vol. 77, iss. 3, pp. 437–471. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2
5. NOAA Physical Sciences Laboratory. Available at: <https://psl.noaa.gov> (accessed 28 April 2023).
6. Borisenkov E. P., Loginov V. F., et al. *Klimaticheskiye anomalii, ikh diagnostika i prognozirovaniye* [Climatic anomalies, their diagnosis and forecasting]. *Obzor VNIIGMI-MTSD, ser. Meteorologiya = Review of VNIIGMI-MCD, series Meteorology*. Obninsk, 1988, issue 6, 62 p. (in Russian)
7. Gruza G. V., Rankova E. Ya., Smirnov V. D. *O prostranstvennom osrednenii v zadachakh monitoringa klimata* [On spatial averaging in climate monitoring tasks]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniye ekosistem = Problems of environmental monitoring and modelling of ecosystems*, 2013, vol. 25, pp. 42–70. (in Russian)

Информация об авторах

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

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

Information about authors

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

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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-13-23>
УДК 911.375:528.85(476.4)

Поступила в редакцию 02.10.2023
Received 02.10.2023

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ г. МОГИЛЁВА

Л. А. Кравчук, А. А. Яновский, Н. М. Баженова

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. С использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и ГИС-проекта территории г. Могилёва исследованы особенности растительного покрова города и его влияния на температуру подстилающей поверхности (LST) в различных типах геотехнических систем (ГТС) крупного города. Наименьшие средние значения LST регистрировались в лесных экосистемах г. Могилёва. За ними следуют резервные озелененные территории, расположенные преимущественно в долинах рек, далее – парки и малые ландшафтные формы. В классе застроенных территорий наиболее высокие средние значения LST относились к производственно-коммунальным ГТС, а низкие – к жилой многоквартирной, общественной застройке и участкам незавершенного строительства. Жилая усадебная застройка характеризовалась наименьшими в данном классе средними значениями LST. Показано наличие обратной связи значений LST с различными характеристиками растительного покрова, полученными по данным ДЗЗ. Коэффициенты корреляции средних значений LST со средними значениями нормализованного разностного индекса растительности (NDVI), индекса листовой поверхности (LAI), содержания в пологе хлорофилла (CCC) и степенью озелененности всех выделов ГТС в городе оцениваются от $-0,6$ до $-0,7$. Более сильные обратные связи отмечены для резервных озелененных территорий, представленных преимущественно древесно-кустарниковой растительностью в долинах рек (варьируют в пределах от $-0,7$ до $-0,8$). Связи ослабевают в ГТС жилой многоквартирной застройки (до $-0,5$ и $-0,6$), ГТС производственно-коммунальных территорий (от $-0,4$ до $-0,6$) и лесах (от $-0,3$ до $-0,6$).

Ключевые слова: город; геотехническая система; растительный покров; дистанционное зондирование.

Для цитирования. Кравчук Л. А., Яновский А. А., Баженова Н. М. Оценка влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности в различных геотехнических системах г. Могилёва // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 13–23.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF VEGETATION COVER ON THE LAND SURFACE TEMPERATURE FOR DIFFERENT GEOTECHNICAL SYSTEMS OF MOGILEV CITY

L. A. Kravchuk, A. A. Yanovskiy, N. M. Bazhenova

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

Abstract. The joint analysis of Earth remote sensing data and geographic information system (GIS) project differentiated by type of geotechnical systems (GTS) for the territory of the city of Mogilev, explored the features of the influence of vegetation cover on the land surface temperature (LST) in various types of GTS of a large city. As part of landscape-recreational territories, the lowest average LST values were recorded in forest ecosystems of the city of Mogilev. They are followed by reserved green areas, located mainly in river valleys, then – parks and small landscape forms. In the class of built-up areas, the highest average LST values were related to industrial and communal structures. They were lower in residential multi-apartment, public and in areas of unfinished construction. Residential estate was characterized by the lowest average LST. It is shown a feedback between LST and various characteristics of vegetation cover obtained from remote sensing data. Correlation of average LST with average normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI), canopy chlorophyll content (CCC) and the degree of greening for all type system in the city are estimated from -0.6 to -0.7 . Stronger feedbacks were noted for reserved green areas (mainly by trees and shrubs in river valleys) varying from -0.7 to -0.8 . The connections are weakening in the GTS of residential multi-apartment buildings (up to -0.5 and -0.6), in the GTS of industrial and communal areas (from -0.4 to -0.6) and forests (from -0.3 to -0.6).

Keywords: city; geotechnical system; vegetation cover; remote sensing.

For citation. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M. Assessment of the influence of vegetation cover on the land surface temperature for different geotechnical systems of Mogilev city. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 13–23.

Введение. Оценка эффективности функционирования растительного покрова в городах особенно актуальна в связи с вопросами улучшения состояния городской среды как среды жизнедеятельности населения. Растительный покров выступает в качестве компенсационного блока геотехнической системы (ГТС), нейтрализующего негативное воздействие техногенных объектов и процессов на городскую среду, в том числе и тепловое воздействие. Ветровой и температурный комфорт являются двумя основными факторами климатического комфорта людей. В условиях городской застройки дифференцированный комфорт могут создавать различия в архитектурной тени, солнечном излучении и ветровых условиях, при этом насаждения играют немаловажную роль.

Особенности влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности в различных типах и видах ГТС исследовали в г. Могилёве с использованием сопряженной обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и дифференцированного в разрезе типов и видов ГТС ГИС-проекта городской территории.

Город Могилёв – крупный административный, культурный и промышленный центр Беларуси. По состоянию на 1 января 2020 г. площадь города составляла 11,85 тыс. га, численность населения – 384,5 тыс. человек. Территория города приурочена к стыку Оршанско-Могилёвской возвышенности и Центрально-Березинской равнины, входящих в состав Поднепровского округа Восточно-Белорусской физико-географической провинции [1]. Современная поверхность города представляет приподнятую пологоволнистую равнину с перепадами высот до 2–3 м, которая прорезана долинами рек и ложбинами. Преобладающие абсолютные отметки в пределах города составляют 160–189 м, максимальные отметки в его северной и северо-западной части – 190–210 м. Отличительной особенностью рельефа является его расчлененность долинами рек Днепр, Дубровенка и Дебря, ручьями, овражно-балочной сетью и суффозионными западинами. Природный комплекс в городе существенно преобразован. Согласно данным реестра земельных ресурсов на момент исследований в городе под застройкой, землями общего пользования и дорогами находилось 50, 11 и 2 % городских земель соответственно. Земли под лесами, древесно-кустарниковой растительностью, водными объектами и болотами занимали 12, 8, 2 и 0,4 % соответственно, доля неиспользуемых земель – 11,0, доля сельскохозяйственных земель – 4,0 %.

Цель работы – выполнить дифференцированную оценку степени озелененности городской территории и влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности в основных типах ГТС г. Могилёва.

Методика и материалы исследований. Для оценки структуры и состояния растительного покрова в г. Могилёве использовали сопряженную обработку данных ДЗЗ и дифференцированного в разрезе типов и видов ГТС ГИС-проекта городской территории. ГТС представлены следующими видами: производственными и коммунально-складскими; жилыми многоквартирными и усадебными высоко-, средне- и низкоплотными; общественными различных типов (административно-деловая, лечебно-оздоровительная, культурно-просветительская, научно-образовательная, спортивная, торгово-бытовая); специальными; сельскохозяйственными; ландшафтно-рекреационными. В последних выделяли леса и лесопарки, парки, малые ландшафтные формы (МЛФ – скверы, сады, бульвары), кладбища, резервные озелененные территории (древесно-кустарниковая, луговая и рудеральная растительность на неудобьях). В целом на территории города идентифицировано около 3 тыс. выделов, где определено 16 типов и 44 вида ГТС. Анализ данных провели преимущественно по типам ГТС, при этом производственные и коммунально-складские объединили (ПК), но ландшафтно-рекреационные анализировали в разрезе видов для выявления их особенностей.

Для характеристики растительности по ДЗЗ использовали данные мультиспектрального прибора (multispectral instrument – MSI) спутника Sentinel-2A, который регистрирует излучение в 13 спектральных каналах видимого диапазона, как ближнего, так и коротковолнового ИК-диапазонов спектра. Использовали каналы с разрешением 10 и 20 м, последние привели к 10 м согласно [3]. Характеристики используемых в работе спектральных каналов спутника Sentinel-2A отражены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики используемых в работе спектральных каналов спутника Sentinel-2A

Table 1. Characteristics of the spectral channels of the Sentinel-2A satellite used in operation

Показатель	Номер канала									
	2	3	4	5	6	7	8	8a	11	12
Центральная длина волны, нм	492,4	559,8	664,6	704,1	740,5	782,8	832,8	864,7	1613,7	2202,4
Ширина канала 0.5 max, нм	66	36	31	15	15	20	106	21	91	175
Пространственное разрешение, м	10	10	10	20	20	20	10	20	20	20

Значения индекса NDVI (normalized difference vegetation index, нормализованный разностный индекс растительности) [4] рассчитали по формуле (номера каналов соответствуют табл. 1):

$$\text{NDVI} = (\text{канал } 7 - \text{канал } 4) / (\text{канал } 7 + \text{канал } 4).$$

Маску растительности извлекли из карты классификации снимка Sentinel-2, созданную при его обработке до уровня 2A.

Индекс листовой поверхности (leaf area index – LAI) и содержание в пологе хлорофилла (canopy chlorophyll content – CCC, мкг/см²) рассчитали с помощью модуля биофизического процессора L2B (L2B biophysical processor) программы Sentinel-2 Toolbox [5]. Расчет LAI и CCC биофизическим процессором проводится на основе нейронных сетей. Обучающая выборка получена авторами модуля с помощью модели переноса излучения [6]. В частности, выполнено моделирование отражательной способности полога для большинства типов и состояния растительности при условии регистрации излучения в спектральных диапазонах каналов Sentinel-2 при возможных значениях геометрии съемки [6].

Из дальнейших расчетов исключили значения LAI и CCC, для которых 1) исходные значения каналов выходят за границы диапазона обучающей выборки; 2) рассчитанные значения LAI и CCC выходят за границу ожидаемого диапазона, т. е. диапазона значений, полученного по обучающей выборке, поскольку в обоих случаях результаты алгоритма в общем случае являются недостоверными.

Для количественной оценки температуры земной поверхности (land surface temperature – LST) г. Могилёва использовали снимки спектрорадиометра ASTER уровня обработки 2, поскольку рассчитанная на их основе кинетическая температура поверхности характеризуется наибольшим эффективным пространственным разрешением из всех доступных на 2019 г. данных ДЗЗ в тепловом диапазоне. Кинетическая температура поверхности (AST_08) рассчитывается на основе атмосферно скорректированных значений яркостной температуры поверхности пяти каналов спектрорадиометра ASTER в диапазоне 8–12 мкм путем применения закона Планка с использованием значений излучательной способности, рассчитываемых по алгоритму разделения температуры и излучательной способности (TES). Алгоритм TES вначале оценивает излучательную способность в тепловых каналах с помощью метода нормализованной излучательной способности (NEM). Данные оценки используются в законе Кирхгофа для учета вклада в яркостную температуру поверхности излучения атмосферы. Затем получаемое значение итеративно вычитается из значения яркостной температуры для оценки излучения поверхности, на основе которого рассчитывается кинетическая температура поверхности.

Единственный безоблачный снимок ASTER территории г. Могилёва за летние месяцы 2019 г. приходился на 3 июня. В работе использован полученный на основе данного снимка продукт AST_08 v003 (ASTER L2 surface kinetic temperature). При расчете AST_08 в качестве источника профилей температуры, влажности и давления атмосферы выбрали, соответственно, продукт MOD07_L2, значений содержания в атмосфере озона – Total ozone analysis using solar backscatter ultraviolet Version 2 (SBUV/2) и TOVS (TOAST) / Earth probe-total ozone mapping spectrometer (EPTOMS). Для оценки содержания в атмосфере аэрозолей использованы данные глобальной модели аэрозолей Научно-исследовательской лаборатории (Naval research laboratory). Выполнили коррекцию геопривязки снимка ASTER и извлекли значения пикселей снимка (значения кинетической температуры поверхности), соответствующие выделам в ГИС-проекте интегральной ГТС г. Могилёва.

Дату используемого в работе снимка Sentinel-2 – 15.06.2019 – определил первый доступный для загрузки безоблачный снимок г. Могилёва, полученный после используемого снимка ASTER. Подбор снимка Sentinel-2 выполнен с помощью web-интерфейса Copernicus open access hub [7]. Выбран снимок Sentinel-2 уровня обработки 1C, который является орторектифицированным снимком, представленным значениями коэффициента отражения на уровне апертуры радиометра с субпиксельной точностью совмещения спектральных каналов. Атмосферную коррекцию выполнили с помощью программы обработки Sen2Cor [8]. Атмосферная коррекция процессора Sen2Cor основана на алгоритме «Атмосферная/топографическая коррекция спутниковых снимков» (ATCOR) [9] и использует модель переноса излучения LIBRADTRAN [10]. Все параметры атмосферных газов и аэрозолей либо определяются непосредственно алгоритмом, либо фиксируются при некотором значении до запуска модели.

Для оценки влияния растительного покрова на LST использовали сведения о структуре и функциональной специфике городской застройки, особенностях природных и природно-антропогенных объектов на территории г. Могилёва. Идентификацию типов и видов ГТС на момент исследования уточняли по данным Геопортала ЗИС УП «БелГипрозем» (gismap.by), схемам озелененных территорий общего пользования г. Могилёва, ведомственным материалам и данным натурных исследований, проведенных ранее.

Результаты и их обсуждение. Анализ данных ГИС-проекта г. Могилёва, дифференцированного в разрезе ГТС (рис. 1), показал, что в пределах городской черты в застроенной части города по площадям преобладают ГТС жилой усадебной, производственно-коммунальной и многоквартирной застройки, встречается также общественная и специализированная, которые составляют 19, 18, 10, 4 и 1 % соответственно. Ландшафтно-рекреационные территории (ЛРТ) – леса, лесопарки, парки малые ландшафтные формы (скверы, бульвары и др.) – занимают приблизительно 35 % городской территории с учетом водных объектов.

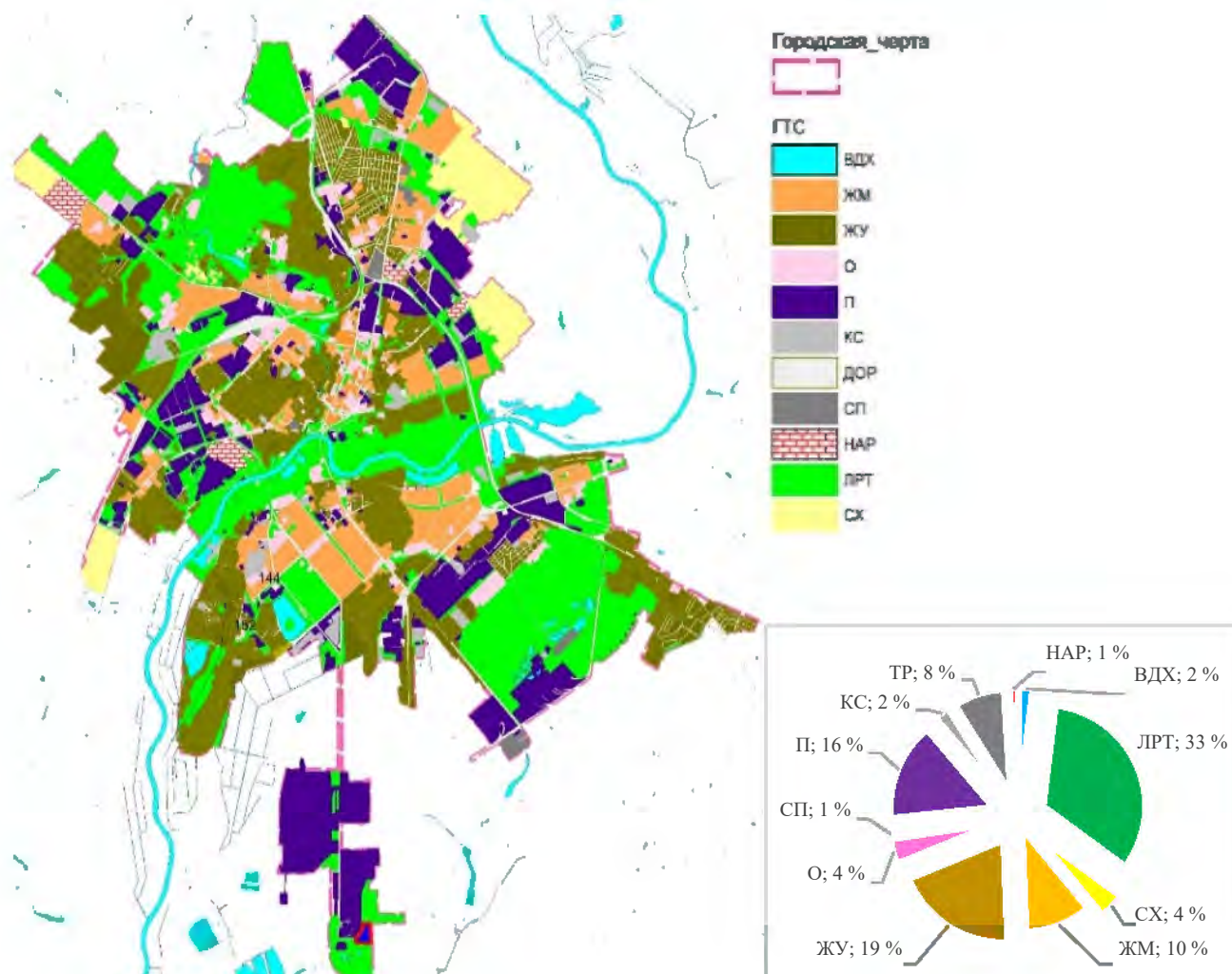


Рис. 1. Структура территории г. Могилёва в разрезе типов ГТС:
 ВДХ – водохозяйственные; ДОР – дорожно-транспортные; ЖМ – жилые многоквартирные, в том числе исторический центр; ЖУ – жилые усадебные; КС – коммунально-складские; ЛРТ – ландшафтно-рекреационные; НАР – нарушенные участки (незавершенное строительство); О – общественные; П – производственные; СП – специальные; СХ – сельскохозяйственные

Fig. 1. Structure of the Mogilev city in the context of GTS types:
 ВДХ – water use areas; ДОР – road and transport infrastructure; ЖМ – residential multi-apartment, including a historical center; ЖУ – residential estate; КС – communal warehouse; ЛРТ – landscape-recreation; НАР – disturbed areas (construction in progress); О – public; П – industrial; СП – special; СХ – agricultural

Как видно из рис. 1, в составе интегральной ГТС г. Могилёва высока доля производственных и коммунально-складских ГТС (18 %). В производственном секторе города функционируют предприятия машиностроения и металлообработки, химической и нефтехимической промышленности, пищевой и легкой промышленности, а также другие, которые образуют крупные комплексы на севере, востоке, западе и юге города. Отдельные предприятия встречаются и в центральной части города. Они, наряду с транспортом, являются основными источниками выбросов в атмосферу и сбросов в водные объекты загрязняющих веществ.

Жилая застройка представлена многоквартирной, усадебной и смешанной застройкой. Особенностью г. Могилёва является высокая доля жилой усадебной застройки (около 19 %). Многоквартирная жилая застройка расположена как в центральной части правобережья города, так и в виде крупных массивов левобережья, при этом она составляет около 10 % от площади городской территории. В г. Могилёве она сформирована в разные годы и отличается по конфигурации, этажности зданий, плотности, степени развития сети проездов, парковок и площадок с твердым покрытием. В жилой многоквартирной застройке разных лет формирования различается и структура озелененных территорий, как по степени озелененности, так и по возрасту и состоянию насаждений.

В состав ЛРТ города включены как природные, так и природно-антропогенные объекты. В г. Могилёве преобладают лесные и лесопарковые территории, занимающие площадь 1385 га (с учетом Лесопарка Печерский). Они представлены преимущественно сосновыми и еловыми формациями с незначительным участием дуба и мягколиственных пород. Лесопарк Печерский приурочен к северо-западной окраине города. Лесные массивы на юго-востоке г. Могилёва, чередуясь с древесно-кустарниковой растительностью и заболоченными землями, расположены между крупными промышленными зонами.

В городе функционируют парки (Парк имени 60-летия Октября, Детский парк аттракционов, Парк имени А. М. Горького, Парк Подниколье) на площади близкой к 161 га. Почти 133 га занимают бульвары (Непокоренных, Днепровский, по ул. Ленина, Юбилейный и др.), многочисленные скверы и озелененные территории общественных центров. На отдельных участках вблизи р. Днепр, на озерах Святое и Гребеневское организованы благоустроенные зоны кратковременного отдыха у воды с пляжами, которые занимают площадь около 87 га, которую горожане активно используют для отдыха. Остальную часть ЛРТ составляют резервные озелененные территории, представленные преимущественно древесно-кустарниковой и луговой растительностью в долинах рек.

Степень озелененности различных ГТС определяли как процентное отношение числа пикселей со значениями NDVI, соответствующими растительности ($>0,4$), к общему числу пикселей в выделе. Это позволило провести дифференцированную оценку степени озелененности территории города, представленную на рис. 2. Из него видно, что в г. Могилёве низкой степенью озелененности характеризуются как ГТС жилой и общественной застройки исторического центра, ряда производственных и коммунально-складских территорий, так и кварталы жилой многоквартирной и общественной застройки левобережья Днепра и северо-западной части города.

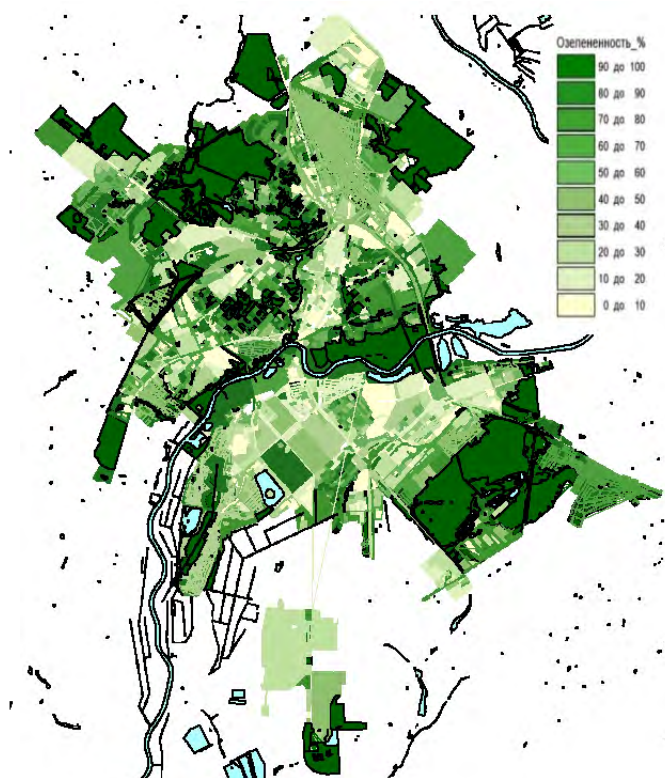


Рис. 2. Схема степени озелененности (%) различных геотехнических систем (ГТС) в г. Могилёве

Fig 2. Scheme of greenery degree (%) of the different geotechnical systems (GTS) in Mogilev

Полученные при обработке ДЗЗ значения вегетационных индексов (NDVI, LAI, CCC) в различных ГТС г. Могилёва отражены на рис. 3, распределение средних значений LAI и CCC на городской территории приведено на рис. 4.

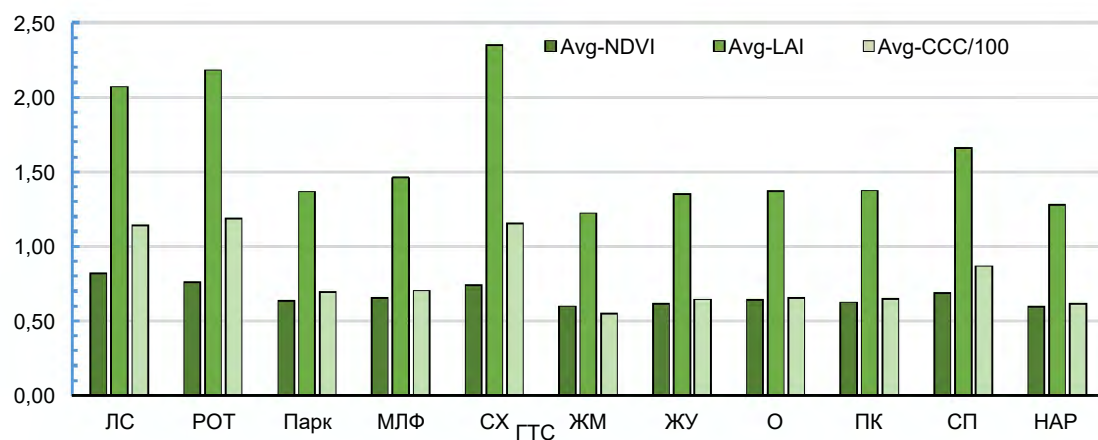


Рис. 3. Средние значения NDVI, LAI, CCC в различных типах ГТС г. Могилёва:
ЛС – лесные; РОТ – резервные озелененные территории; МЛФ – малые ландшафтные формы (скверы, бульвары и др.); СХ – сельскохозяйственные; ЖМ – жилая многоквартирная, в том числе исторический центр; ЖУ – жилая усадебная; О – общественная; ПК – производственная и коммунально-складская; СП – специальная застройка; НАР – участки незавершенного строительства

Fig. 3. The average NDVI, LAI, CCC in different GTS of Mogilev:
ЛС – forest; РОТ – reserve green areas; МЛФ – small landscape forms (squares, boulevards); СХ – agricultural; ЖМ – residential multi-apartment, inkling a historical center; ЖУ – residential estate; О – public; ПК – industrial and communal warehouse; СП – special; НАР – areas of current development

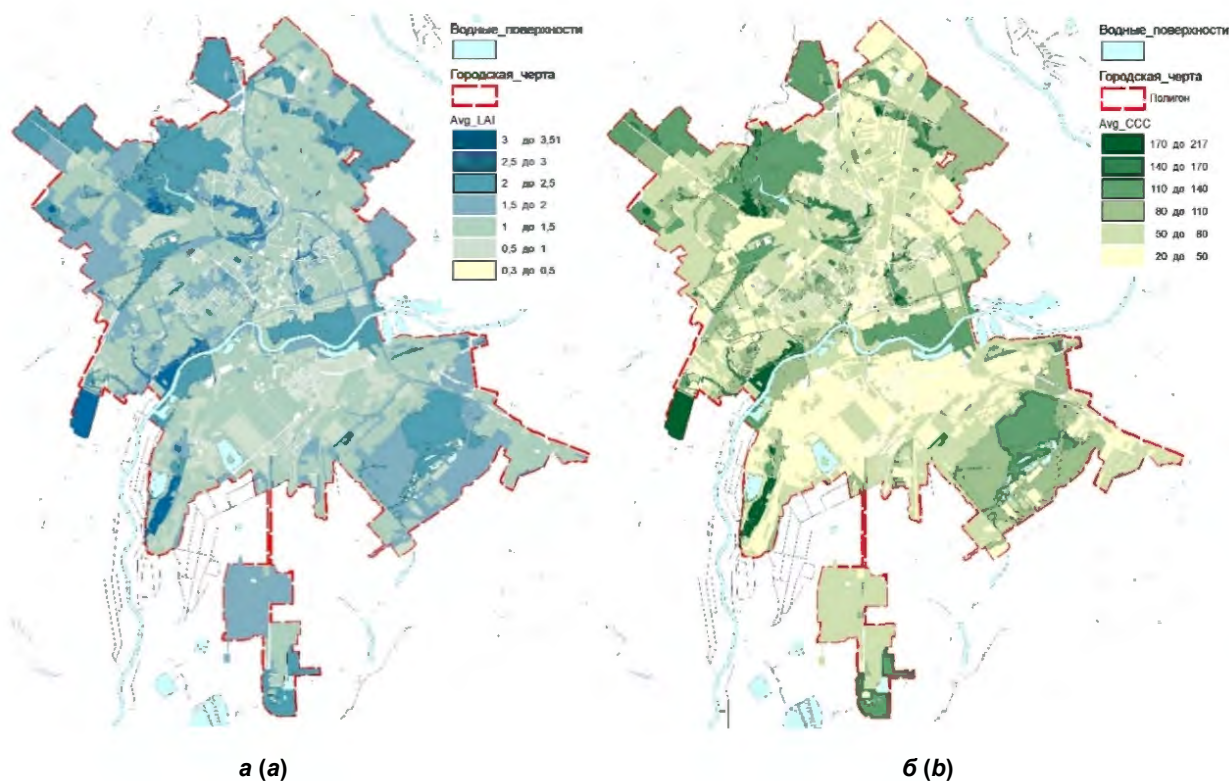


Рис. 4. Схема распределения в различных ГТС г. Могилёва: а – средних значений индекса листовой поверхности (Avg_LAI); б – содержания хлорофилла в пологом (Avg_CCC)

Fig. 4. Scheme of distribution in the different GTS of Mogilev city:
a – the mean values of leaf area index (LAI); b – canopy chlorophyll content (CCC)

Из рис. 3 и 4 видно, что на незастроенных территориях наиболее высокими средними значениями вегетационных индексов характеризуются лесные и лесопарковые территории, несколько ниже они на сельскохозяйственных землях и резервных озелененных территориях. Последние представлены древесно-кустарниковой и луговой растительностью, расположенной преимущественно в долинах рек, балках и на заболоченных территориях. Из всех вегетационных индексов средние значения LAI наиболее высокие в лесах, а также на сельскохозяйственных землях, находящихся на момент съемки на стадии интенсивного вегетативного развития.

Парки г. Могилёва (Парк аттракционов, Парк имени 60-летия Октября, Парк Подниколье и др.) отличаются сравнительно невысокими значениями NDVI, LAI и CCC. Например, в Парке аттракционов причинами этого являются низкое участие деревьев и кустарников, высокая доля рекреационной инфраструктуры (аттракционы, дорожки, площадки). В парке 60-летия Октября невысокие показатели LAI и CCC связаны с разреженными древостоями, преобладающим участием саженцев и молодых деревьев в составе насаждений, а также с деградацией травянистого покрова из-за рекреационных нагрузок. Для МЛФ (скверов, бульваров и озелененных территорий общественных центров) сравнительно низкие значения индексов возможно объяснить высокой долей поверхностей с искусственным покрытием. Это обуславливает более существенное участие смешанных пикселей, включающих одновременно несколько классов поверхностей.

В составе ГТС застроенной части города средние значения вегетационных индексов ниже и варьируют для NDVI в пределах 0,6–0,7 мкг/см², для LAI – 1,2–1,7, для CCC – 55–87 мкг/см². Незначительное увеличение этих показателей характерно для жилой усадебной застройки, а также спецтерриторий.

Структура и состояние всех компонентов ГТС (зданий и сооружений, поверхностей с покрытием, растительного покрова) обуславливают особенности температуры подстилающей поверхности, которая в конечном итоге определяет температурный режим атмосферного воздуха в городе.

Для выявления особенностей формирования «островов тепла» в летний период для г. Могилёва выполнили расчеты значений LST в разрезе выделов городских ГТС на момент наиболее интенсивного развития растительности. Средние значения LST в различных ГТС г. Могилёва приведены на рис. 5 и 6.

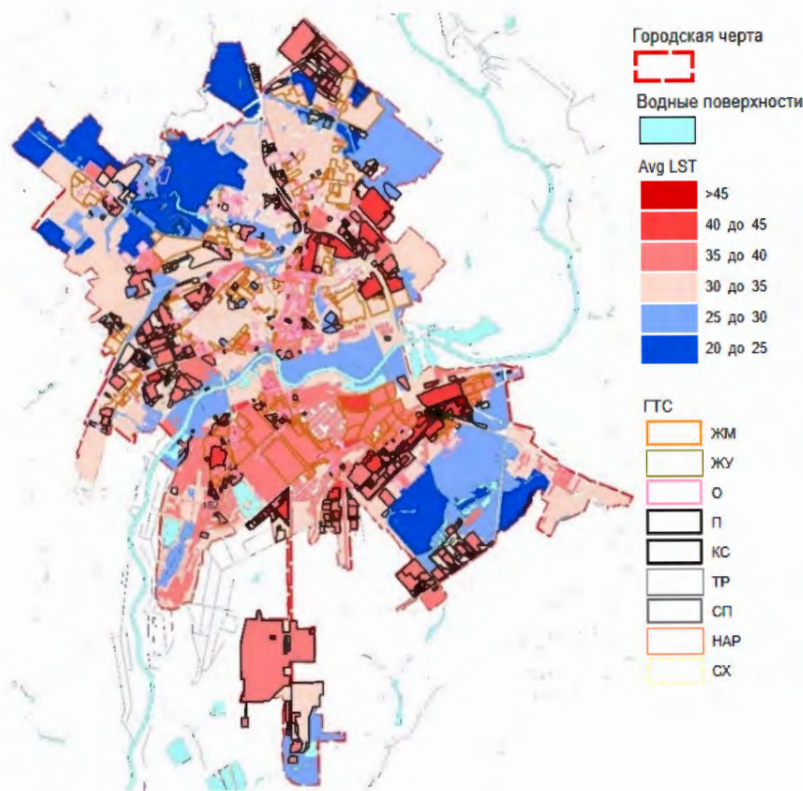


Рис. 5. Средние значения температуры подстилающей поверхности (Avg_LST) в различных геотехнических системах (ГТС) на территории г. Могилёва (дата съемки 03.06.2019, температура воздуха по данным архива погоды +23 °С). Обозначения те же, что и на рис. 1

Fig 5. Average values of the land surface temperature (Avg_LST) in different geotechnical systems (GTS) on the territory of Mogilev (imaging date 03.06.2019, air temperature according to the weather archive +23 °C). The designations are the same as in the fig. 1

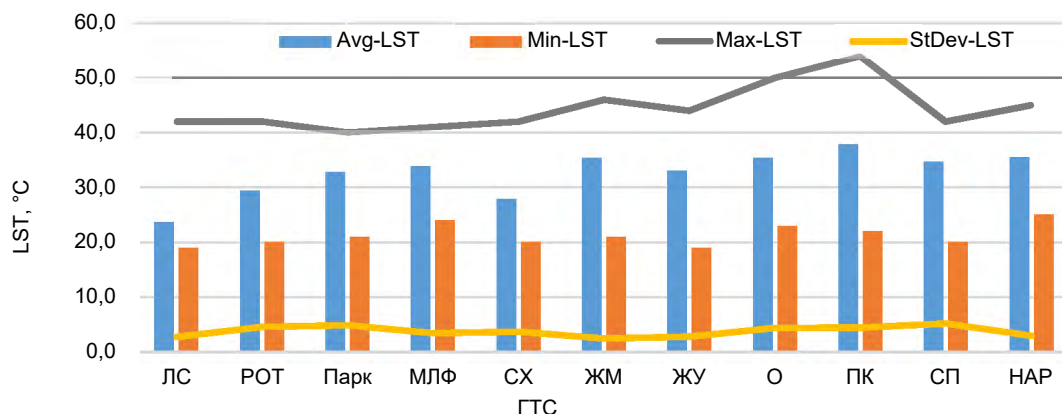


Рис. 6. Значения LST в различных геотехнических системах (ГТС) на территории г. Могилёва. Обозначения те же, что и на рис. 3

Fig 6. LST values in various geotechnical systems (GTS) of Mogilev. The designations are the same as in the fig. 3

Как видно из рис. 5 и 6, на момент исследования наименьшие средние значения LST (23,6 °C с некоторым варьированием) регистрировались в лесных экосистемах г. Могилёва. Несколько более высокими температурами, нежели леса, характеризуются древесно-кустарниковая растительность в долинах рек Днепр и Дубровенка, а также на юго-востоке города на участках с лесной и древесно-кустарниковой растительностью. Средние значения LST в парках варьируют в пределах 32,4...32,8 °C. Это объясняется высоким участием в их составе рекреационной инфраструктуры (дорожек, площадок, аттракционов). Наиболее высокими средними показателями LST характеризуются МЛФ (скверы, бульвары и др.), где средние значения LST достигают почти 34 °C.

В классе застроенных территорий наиболее высокие средние значения LST (близкие к 38 °C) отмечаются для производственно-коммунальных ГТС, здесь же регистрируется и наиболее высокий максимальный показатель LST (54 °C). В составе данных ГТС высока доля техногенно-преобразованных участков – производственных зданий, сооружений, коммуникаций, площадок, дорожной инфраструктуры. Помимо этого, ряд производственно-коммунальных объектов является источником техногенных эмиссий тепла, пара и загрязняющих веществ от технологических процессов и транспорта. Насаждения в них обычно представлены небольшими декоративными группами, аллеями или одиночными деревьями и кустарниками. В составе этих ГТС иногда встречается спонтанная древесно-кустарниковая и сорная травянистая растительность на неудобьях и нарушенных землях.

Несколько ниже средние показатели LST в ГТС жилой многоквартирной, общественной застройки и на участках незавершенного строительства (35,3...35,4 °C). Здесь природная основа существенно преобразована подземными сооружениями, коммуникациями, многоэтажными жилыми зданиями, дорожками, проездами, бытовыми устройствами и элементами рекреационной инфраструктуры (детские игровые, спортивные площадки и др.). Насаждения представлены небольшими массивами, группами или одиночными деревьями и кустарниками. Травянистый ярус, как правило, разрежен из-за систематической косыбы и рекреационных нагрузок, представлен газонными травами и изредка цветниками на придомовых территориях.

Жилая усадебная застройка имеет сходные средние показатели LST (около 32 °C). Здесь природный комплекс преобразован коммуникациями, зданиями и подсобными хозяйственными постройками, дорожками и площадками. Размер и состояние участков с овощными, плодовыми и декоративными культурами зависит от вида усадебной застройки, приемов ухода за ними.

В составе ГТС общественных территорий природный комплекс преобразуется коммуникациями, зданиями, сооружениями, дорожками и площадками с твердым покрытием, состав которых определяется видом общественных ГТС (научно-образовательные, лечебные, административно-деловые и др.). Структура озелененных территорий также во многом определяется видом общественных ГТС и может варьировать от массивов или групп древесно-кустарниковой растительности до единичных деревьев и кустарников, партерных, спортивных газонов или цветников.

Оценку LST дорожно-транспортной инфраструктуры не проводили по причине несоответствия данной задаче пространственного разрешения используемых в работе снимков в тепловом диапазоне.

Оценка связи средних значений LST с различными характеризующими растительный покров показателями, полученными по данным ДЗЗ для всей территории г. Могилёва и различных типов ГТС, отражена в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты парной линейной корреляции средних значений LST с показателями дистанционного зондирования, характеризующими растительный покров г. Могилёва

Table 2. Paired linear correlation coefficients of mean LST values with remote sensing indicators characterizing the vegetation cover of Mogilev

Тип ГТС	NDVI _{ср.}	LAI _{ср.}	CCC _{ср.}	Степень озелененности, %	Тип ГТС	NDVI _{ср.}	LAI _{ср.}	CCC _{ср.}	Степень озелененности, %
Все типы	-0,6	-0,7	-0,6	-0,7	РОТ	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7
ЖМ	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	ЛЕС	-0,6	-0,3	-0,3	-0,3
ЖУ	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	ПАРК	-0,8	-0,8	-0,8	-0,6
ПК	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	МЛФ	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6
О	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7	—	—	—	—	—

Связь средних значений LST со степенью озелененности для всех ГТС города просматривается на рис. 7, а, со средними значениями LAI для отдельных типов ГТС – на рис. 7, б–д.

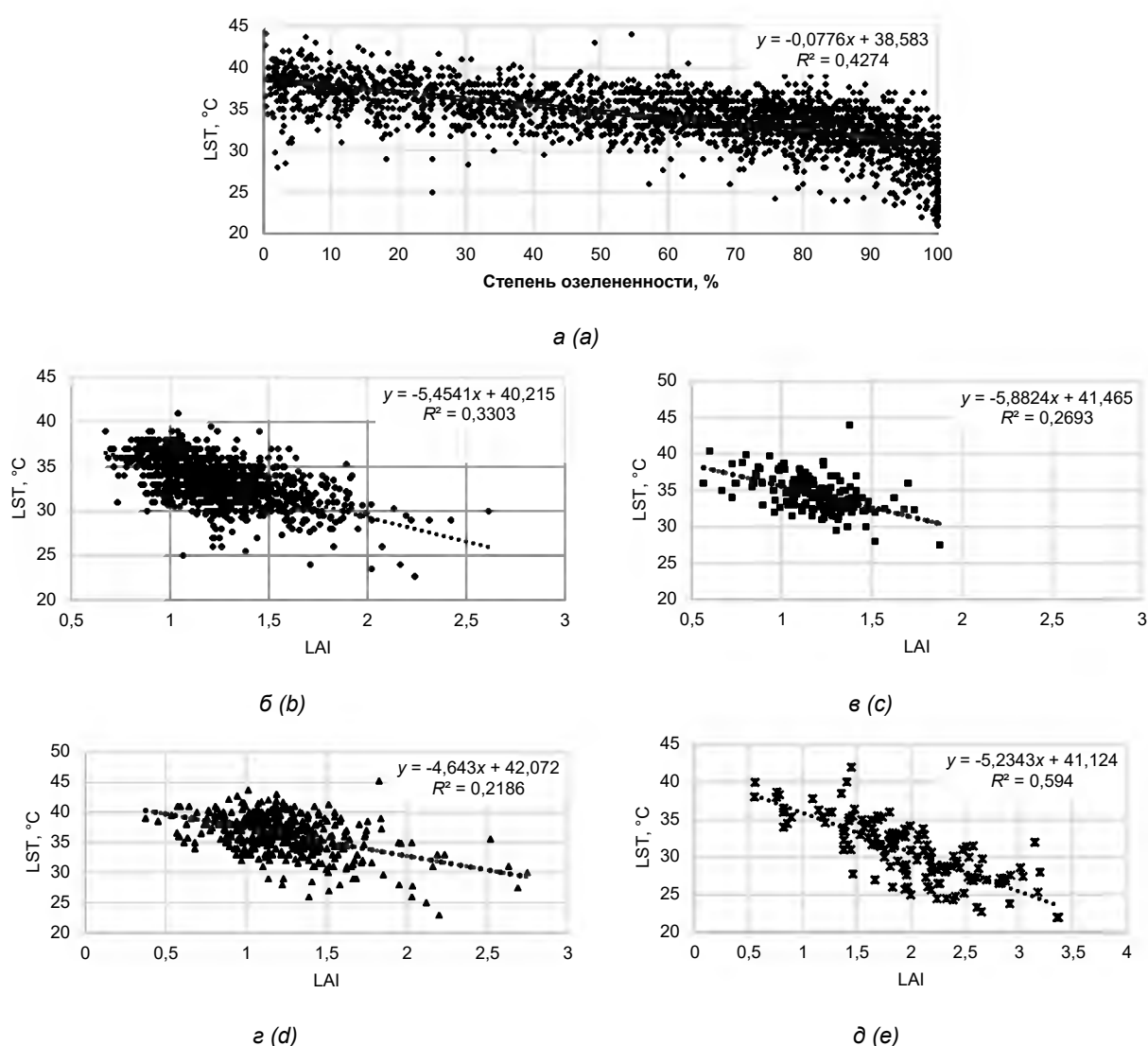


Рис. 7. Связь средней температуры подстилающей поверхности (LST_{avg}): а – со средними показателями степени озелененности в ГТС для всей территории Могилёва; со средними значениями LAI: б – для ГТС жилой усадебной застройки; в – для ГТС жилой многоквартирной застройки с учетом исторического центра; г – для производственно-коммунальных ГТС; д – для резервных озелененных территорий

Fig. 7. Relationship between the average land surface temperature (LST_{avg}) with: а – the average of the greenery degree for the entire territory of Mogilev; average LAI: б – for residential estate; в – for residential multi-apartment buildings and historical centre, д – for industrial GTS; е – for reserve green areas

Заключение. С использованием сопряженного анализа данных ДЗЗ из космоса и дифференцированного в разрезе видов ГТС ГИС-проекта территории г. Могилёва были определены особенности распределения показателей, характеризующих структуру и состояние растительного покрова (NDVI, LAI, CCC), а также степени озелененности городской территории на момент обследования. Это позволило выявить участки с низкой озелененностью, ослабленной растительностью в составе интегральной ГТС города. Низкой степенью озелененности отличаются как ГТС жилой и общественной застройки исторического центра, ряда производственных и коммунально-складских территорий, так и кварталы жилой многоквартирной и общественной застройки левобережья Днепра и северо-западной части города.

Температурный режим воздуха городской территории определяется прежде всего температурой подстилающей поверхности, которая, в свою очередь, в существенной степени зависит от типа ГТС (структуры и состояния всех компонентов – зданий и сооружений, поверхностей с покрытием, растительного покрова и др.). На момент исследования наименьшие средние значения LST регистрировались в лесных экосистемах г. Могилёва. За ними следовали резервные озелененные территории (древесно-кустарниковая растительность в долинах рек Днепр и Дубровенка, а также на юго-востоке города). Далее следовали парки города, а наиболее высокими средними значениями LST в составе ландшафтно-рекреационных территорий характеризовались малые ландшафтные формы (скверы, бульвары и др.). В классе застроенных территорий наиболее высокие, средние и максимальные значения LST относились к производственно-коммунальным ГТС. Несколько ниже они были в ГТС жилой многоквартирной, общественной застройки и на участках незавершенного строительства. Замыкает данный ряд жилая усадебная застройка.

Для территории города показано наличие обратной связи значений LST с различными показателями, характеризующими растительный покров: коэффициенты парной линейной корреляции средних значений LST со средними значениями NDVI, LAI, CCC и степенью озелененности наиболее высокие для парков и резервных озелененных территорий, представленных древесно-кустарниковой и луговой растительностью в долинах рек, а также для города в целом. Они слабее в ГТС застроенной части города. Низкими связями отличаются леса и лесопарки, где выявленные особенности связи требуют дополнительных исследований с учетом размеров и местоположения выделов, структуры и состояния растительности.

Список использованных источников

1. Нацыянальны Атлас Беларусі / Камітэт па зямельных рэсурсах, геадэзіі і картаграфіі пры Савеце Міністраў Рэспублікі Беларусь. – Мінск, 2002. – 292 с.
2. 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.
3. 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, no. 8. – P. 4610–4617. doi:10.1109/TGRS.2017.2694881
4. Copernicus Open Access Hub [Electronic resource]. – Mode of access: <https://scihub.copernicus.eu/>. – Date of access: 23.02.2022.
5. Mayer, B. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use / B. Mayer, A. Kylling // Atmos. Chem. Phys. – 2005. – Vol. 5. – P. 1855–1877. doi:10.5194/acp-5-1855-2005
6. Richter, R. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide. DLR IB 565-01/15 / R. Richter, D. Schlöpfer. – 2016. – 263 p.
7. Sen2Cor 2.10 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>. – Date of access: 23.02.2022.
8. Sentinel-2 Toolbox [Electronic resource]. – Mode of access: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox>. – Date of access: 23.02.2022.
9. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C. J. Tucker // Remote Sens. Environ. – 1979. – Vol. 8, iss. 2. – P. 127–150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0
10. Weiss, M. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 2.0) / M. Weiss, F. Baret, S. Jay. – 24.08.2020. – 60 p.

References

1. *Nacyyanal'ny Atlas Belarusi* [National Atlas of Belarus]. *Kamitet pa zyamel'nyh resursah, geadezii i kartagrafii pry Savece Minictrau Respubliki Belarus' = Committee on Land Resources, Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the Republic of Belarus*. Minsk, 2002, 292 p. (in Belarusian)

2. 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)
3. Brodu N. Super-resolving multiresolution images with band-independent geometry of multispectral pixels. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, vol. 55, iss. 8, pp. 4610–4617. doi:10.1109/TGRS.2017.2694881
4. Copernicus Open Access Hub. 2022. Available at: <https://scihub.copernicus.eu> (accessed 23 February 2022).
5. Mayer B. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.*, 2005, vol. 5, pp. 1855–1877. doi:10.5194/acp-5-1855-2005
6. Richter R., Schläpfer D. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide. DLR IB 565-01/15, 2016, 263 p.
7. Sen2Cor 2.10. Available at: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> (accessed 23 February 2022).
8. Sentinel-2 Toolbox. Available at: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox> (accessed 23 February 2022).
9. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 1979, vol. 8, iss. 2, pp. 127–150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0
10. Weiss M., Baret F. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 2.0), 2020, 60 p.

Информация об авторах

Кравчук Людмила Александровна – кандидат географических наук, доцент, 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, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanouski@ya.ru

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

Author information

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

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

Natallia 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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

О. Ю. Круковская, С. В. Какарека

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Автомобильный транспорт является значимой категорией поступления в атмосферный воздух многих загрязняющих веществ, количественная и пространственно-временная точность оценок выбросов от которой играет важную роль в изучении загрязнения воздуха и выработке управленческих решений. В работе представлена методология получения оценки годовых выбросов с использованием восходящего подхода на основании моделирования пробега транспортных средств с пространственным разрешением 1 км × 1 км для всей территории Беларуси. Показана высокая пространственная неоднородность и различия в территориальной структуре выбросов различных загрязняющих веществ. Представлен вклад дорог различного уровня в суммарные выбросы, выявлены категории транспортных средств, их формирующие. Рассчитаны плотности выбросов оксида углерода, оксидов азота, неметановых летучих органических соединений и тонкодисперсных твердых частиц на урбанизированных и прочих территориях.

Ключевые слова: автомобильный транспорт; выбросы; атмосферный воздух; оксид углерода; оксиды азота; твердые частицы; неметановые летучие органические соединения; урбанизированные территории.

Для цитирования. Круковская О. Ю., Какарека С. В. Моделирование выбросов загрязняющих веществ автомобильного транспорта с высоким пространственным разрешением // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 24–38.

MODELING ROAD TRANSPORT EMISSIONS OF POLLUTANTS WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION

O. Yu. Krukowskaya, S. V. Kakareka

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

Abstract. Road transport is a significant contributor to atmospheric air pollution, and accurate estimates of emissions are crucial for understanding and managing air pollution. This paper presents a bottom-up approach for estimating annual emissions based on vehicle mileage modeling with a spatial resolution of 1 km × 1 km for the entire territory of Belarus. The study highlights the high spatial heterogeneity and differences in the territorial structure of emissions of various pollutants. It also identifies the contribution of roads of different levels and categories of vehicles that form them. The emission densities of four major pollutants, namely carbon monoxide, nitrogen oxides, non-methane volatile organic compounds, and fine particulate matter in urban and other areas were calculated.

Keywords: road transport; emissions; atmospheric air; carbon monoxide; nitrogen oxides; particulate matter; non-methane volatile organic compounds; urban areas.

For citation. Krukowskaya O. Yu., Kakareka S. V. Modeling road transport emissions of pollutants with high spatial resolution. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 24–38.

Введение. Интенсивный рост парка транспортных средств обостряет проблемы качества воздуха в городах, ухудшает качество жизни населения и является серьезной проблемой для контроля загрязнения воздуха. На урбанизированных территориях автомобильные выбросы являются причиной значительной части содержащихся в локальной атмосфере загрязняющих веществ [1, 2]. При разработке программ управления качеством воздуха наиболее часто первым шагом становится разработка кадастра (оценки) выбросов, учитывающая все категории источников выбросов, включая передвижные [2, 3]. Посредством оценок выбросов определяется количество выбрасываемых веществ, на их основе разрабатываются меры регулирования качества воздуха, определяются наилучшие доступные технологии контроля, оцениваются перспективы [2, 4].

Рекомендуется, чтобы оценки выбросов описывали пространственное распределение и временную изменчивость. Однако во многих случаях оценки выбросов от мобильных источников скудны и учитывают только суммарные выбросы, главным образом из-за отсутствия метода решения проблемы нехватки данных [2, 5, 6].

Статистические данные о выбросах от передвижных источников в Беларуси до настоящего времени формируются посредством оценок с использованием методик обобщенного уровня [7, 8] с региональным пространственным разрешением (в разрезе областей и г.Минска) [9]. Опубликованная информация о пространственной структуре выбросов передвижных источников высокого разрешения ограничена. Оценки с большей детализацией (в настоящее время по сетке $0,1^\circ \times 0,1^\circ$) для дорожных передвижных источников для отдельных загрязняющих веществ (основные загрязняющие вещества, CO, Cg, Pb, Hg) выполняются 1 раз в 4 года в Институте природопользования в рамках подготовки отчетности для Программы ЕМЕП Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния.

Заполнение пробелов в исходных данных возможно посредством моделирования с использованием различных подходов. В зависимости от используемых исходных данных они разделяются на нисходящие («сверху вниз») и восходящие («снизу вверх»). При нисходящем подходе выбросы рассчитываются на национальном уровне или берутся из национальных кадастров, а затем распределяются по желаемой сетке с использованием данных о деятельности, таких как плотность дорог [10–14], пробег транспортных средств [11, 12, 15, 16], плотность населения [12] или потребление топлива [15]. Приоритет использования данных о деятельности, наиболее близких к интенсивности движения транспортного потока, например суммарного пробега, при распределении выбросов показан в работе [17].

При применении восходящей методологии используются данные по отдельным источникам или участкам дорог, такие как пробег транспортных средств различных категорий по конкретным улицам или отдельных транспортных средств в ведении юридических лиц, с учетом различных характеристик движения транспорта, например: скорость транспортного средства, расход топлива, пробег по показаниям приборов транспортных средств, снаряженная масса, соответствие экологическим стандартам [18–20]. Сравнительные исследования двух подходов [19, 21] позволяют сделать вывод о предпочтительности восходящей оценки при наличии достаточной информации.

Вне зависимости от используемого подхода для характеристики и отображения пространственной структуры выбросов от автомобильного транспорта, который относится к источникам линейного типа, чаще всего используются два способа. В первом случае автомобильные дороги отображаются на карте как линейный объект, повторяющий форму исходной дороги и проведенный по ее осевой линии. Количество выбрасываемых загрязняющих веществ в таком случае отображается либо интенсивностью окраски линии, либо ее толщиной. Такой способ применен в работах [1, 11]. Как правило, его применяют для небольшой территории (район города, участок пригородной территории) [11]. При использовании такого способа на уровне региона или страны воспроизводятся только крупнейшие автомобильные дороги, полнота отображения источников теряется. Для пространственного представления выбросов на уровне стран и регионов чаще используется второй способ, предполагающий отображение с использованием регулярной сетки (прямоугольной, гексагональной). Интенсивность окрашивания каждой из ячеек сетки устанавливается в соответствии с суммой выбросов от всех линейных источников в ее пределах. Этот способ является универсальным и наиболее полным, используется в отдельных странах [12, 14, 16, 18, 21] и международной практике [22].

Цели работы – создать и апробировать методические подходы к моделированию годовых выбросов загрязняющих веществ от автомобильного транспорта с использованием регулярной прямоугольной сетки с пространственным разрешением $1 \text{ км} \times 1 \text{ км}$ для всей территории Беларуси, провести анализ территориальной структуры выбросов, выявить территории с наибольшей интенсивностью выбросов. Оценка выполнена для 2015 года. В данное исследование включены четыре загрязняющих вещества: оксид углерода (CO), неметановые летучие органические соединения суммарно (НМЛОС), оксиды азота (NO_x) и тонкодисперсные твердые частицы с аэродинамическим диаметром менее $2,5 \text{ мкм}$ (ВЧ2.5).

Методология и исходные данные. В данной работе предлагается метод оценки выбросов с высоким пространственным разрешением для автомобильного транспорта с использованием восходящего подхода, основанный на моделировании суммарного годового пробега в разрезе категорий транспортных средств с последующей оценкой выбросов с использованием метода удельных показателей. Сопоставимость с валовыми оценками для страны [23] обеспечивается за счет использования в качестве граничных условий валовых значений суммарного годового пробега автомобильного транспорта всех категорий, а также удельных показателей выбросов, приведенных на единицу пробега по категориям транспорта, полученных из таких оценок.

Исходные данные.

Парк транспортных средств. Зарегистрированный парк автомобильных транспортных средств в Беларуси в 2015 г. составил 3912,3 тыс. ед., в том числе 3037,2 тыс. легковых автомобилей, 418,0 тыс. грузовых автомобилей, 46,8 тыс. автобусов и 401,3 тыс. мотоциклов [9]. Для целей моделирования пробега и выбросов от автомобильного транспорта выполнена параметризация парка транспортных средств в соответствии с классификатором модели COPERT [24, 25], применяемой на различных этапах в данном исследовании. Транспортные средства разделены на пять категорий: легковые автомобили (LD4C), микроавтобусы (грузовые и пассажирские) (LD4T), грузовые автомобили (HDT), автобусы (HDB) и мотоциклы (включая другие двухколесные транспортные средства) (LD2).

Для целей оценки выбросов из общего числа грузовых автомобилей выделяют малые коммерческие автомобили полной массой до 7,5 т и микроавтобусы из числа автобусов. Оценено, что из общего количества транспортных средств микроавтобусами (грузовыми и пассажирскими) являются 167,4 тыс. ед., грузовыми автомобилями (HDT) – 290,0 тыс., автобусами (HDB) – 7,4 тыс. ед.

Для валовой оценки выбросов на национальном уровне используются также следующие входные параметры, касающиеся парка транспортных средств, оценка которых выполнена на основании обобщений производственно-статистической информации, данных о вторичном рынке транспортных средств и с использованием экспертной оценки [23].

Потребление топлива. Согласно статистическим данным [9], суммарный расход транспортных топлив (с учетом потребления всеми типами передвижных источников) в 2015 г. составил 1069 тыс. т бензина, 2013 тыс. т дизельного топлива, 324 тыс. т биодизельного топлива. Кроме того, на работу автомобильного транспорта также расходуется 150 тыс. т сжиженного газа и 9 млн м³ сжатого газа. Характеристики топлива использованы в соответствии с действующими стандартами.

Суммарный годовой пробег транспортных средств. Величина среднегодового пробега в разрезе категорий и экологических классов транспортных средств непосредственно используется при расчете уровня выбросов. Однако значения этого показателя не подлежат учету и не могут быть получены из официальных статистических отчетов напрямую. Ориентировочные уровни могут быть оценены по данным вторичного рынка транспортных средств. В актуальной версии модели COPERT используются механизмы статистической коррекции пробега, исходя из первичной оценки значений этого показателя, а также фактических данных о парке транспортных средств и суммарном потреблении топлива. В ходе годовой оценки выбросов в рамках работы [23] установлено, что суммарный годовой пробег автомобильного транспорта составляет 27 750 млн маш·км, в том числе 19 490 млн маш·км легкового транспорта и 4122 млн маш·км грузовых автомобилей.

Интенсивность движения транспорта предоставлена по запросу РУП «Белдорцентр» [26] для отдельных участков дорог международного и республиканского значения в разрезе категорий транспорта в суточном среднегодовом исчислении. С учетом протяженности дорог, годовой измеренный пробег автомобильного транспорта составляет 17 920 млн маш·км, в том числе 11 535 млн маш·км легкового транспорта и 3411 млн маш·км грузовых автомобилей.

Картографическая основа для моделирования построена на геоинформационной системе с открытыми данным OpenStreetMap OSM [27]. Проведена корректировка отнесения дорог к группам и выделения дорог, используемых для движения автомобильного транспорта, в отдельных случаях стыковка участков дорог. Для целей моделирования пробега и выбросов дороги разделены на две группы: первостепенного и второстепенного значения. К дорогам первостепенного значения отнесены участки улично-дорожной сети международного и республиканского значения, для которых выполняются инструментальные замеры фактической интенсивности движения. Все остальные участки улично-дорожной сети отнесены к дорогам второстепенного значения. Анализ картографической основы показал, что суммарная протяженность дорог первостепенного значения составляет 15,5 тыс. км, второстепенного – 215,2 тыс. км.

Разделение территорий на урбанизированные и прочие выполнено также с использованием картографической основы [27]. К урбанизированным территориям отнесены участки территории в пределах городских населенных пунктов. Использовано разбиение ячеек целевой сетки границами населенных пунктов с распределением смоделированного пробега и выбросов пропорционально распределению площадей.

Метеорологические параметры. Для учета работы двигателей в различных режимах и поступления загрязняющих веществ в атмосферный воздух посредством испарения топлива и других технических жидкостей в качестве исходных данных используются также метеорологические параметры: среднемесячные значения средних из максимальных и минимальных суточных температур, среднемесячная относительная влажность воздуха [25]. Данные в установленном формате модели COPERT подготовлены на основании срочных наблюдений за исследуемый период [28].

Данные о землепользовании выделены из глобальной базы типов землепользования [29], имеющей пространственное разрешение 10 м.

Моделирование территориальной структуры пробега транспорта.

Оценка интенсивности движения и пробега на всех автомобильных дорогах основана на фактических замерах среднегодовой интенсивности движения на отдельных участках дорог и суммарных значениях пробега для всей страны, используемых в качестве граничных условий для расчета интенсивности на дорогах, где не выполняются замеры интенсивности. Моделирование пробега выполнено для всей территории страны для ячеек сетки 1 км × 1 км.

Моделирование территориальной структуры пробега автомобильного транспорта включало следующие этапы:

- подготовку геоинформационной основы улично-дорожной сети;
- пространственную привязку результатов замеров интенсивности движения транспорта на отдельных участках дорог, расчет протяженности участков дорог с известной интенсивности и суммарный пробег транспорта в их пределах;
- расчет суммарных значений годового пробега автотранспорта, полученных в результате моделирования выбросов на национальном уровне с использованием модели COPERT, и суммарного пробега на дорогах с неизвестной интенсивностью движения;
- получение сплошного нормированного поля интенсивности движения транспорта путем интерполяции (иерархические базисные сплайны) фактических данных интенсивности движения в выборочных точках (регулярная пространственная выборка) для сетки 10 км × 10 км для всей страны, построение ключей перехода поля интенсивности к более дробной сетке 1 км × 1 км;
- выполнение классификации дорог в соответствии с исходными типами дорог [27] по интенсивности движения, получение коэффициентов интенсивности трафика по типам дорог;
- выполнение расчета в пределах ячеек сетки средневзвешенных коэффициентов использования автомобильного транспорта в зависимости от класса землепользования на основании данных о типах землепользования с использованием коэффициентов (табл. 1) классов поверхности;
- решение задачи распределения суммарного пробега дорог с неизвестной интенсивностью на основании равного вклада полученных ранее поля интенсивности трафика и коэффициентов трафика по типам дорог; расчет на уровне страны значений коэффициентов балансировки смоделированного, измеренного и суммарного пробега по категориям транспортных средств; получение нормированного и абсолютного распределения интенсивности движения транспорта на всех дорогах с целевым пространственным разрешением.

Таблица 1. Взвешивающие коэффициенты использования автомобильного транспорта в зависимости от класса землепользования

Table 1. Weighing coefficients for the use of road transport depending on land use category

Класс поверхности	Коэффициент использования автомобильного транспорта
Водные объекты	0
Деревья	0,001
Трава	0,004
Затопленная растительность	0
Посевы	0,004
Кустарниковая растительность	0,00001
Застройка	1
Без покрытия	1
Снег/лед	0

В результате суммарный годовой пробег автомобильного транспорта категории p в пределах ячейки i $ML_{i,p}$ определяется с использованием уравнений

$$ML_{i,p} = ML_{i,p}^{fact} + ML_{i,p}^{model}, \quad (1)$$

$$ML_{i,p}^{model} = ML_p^{model} f_{mi,p}^{model} = ML_p^{model} L_{i,f} (a \cdot f_{class_{f,p}} + b \cdot I_{i,p}) I_{u_i}, \quad (2)$$

где $ML_{i,p}^{fact}$ – суммарный годовой пробег транспортных средств категории p в пределах ячейки i на участках дорог с измеренной интенсивностью движения; $ML_{i,p}^{model}$ – суммарный годовой пробег транспортных средств категории p в пределах ячейки i на участках дорог со смоделированной интенсивностью движения; $f_{ml_{i,p}}^{model}$ – фактор территориальной структуры интенсивности движения на дорогах второстепенного значения; $L_{i,f}$ – суммарная протяженность дорог группы f в пределах ячейки i ; $f_{class_{f,p}}$ – средняя относительная интенсивность движения транспортных средств категории p для дорог группы f . Установлена на основании литературных данных и результатов собственных замеров интенсивности движения и структуры транспортного потока на различных участках дорог; $l_{i,p}$ – коэффициент нормированной распределенной интенсивности движения транспорта суммарно для всех категорий транспортных средств категории p в пределах ячейки i ; l_{u_i} – средневзвешенный в пределах ячейки i коэффициент использования автомобильного транспорта в зависимости от класса землепользования; a и b – безразмерные коэффициенты для выравнивания вклада коэффициентов $f_{class_{f,p}}$ и $l_{i,p}$ соответственно в результирующую вариабельность пробега.

Выполнение граничного условия по суммарному пробегу проявляется в выполнении уравнения (1) суммарно для всех ячеек, покрывающих территорию страны, в виде уравнения

$$ML_p = ML_p^{fact} + ML_p^{model}, \quad (3)$$

где ML_p^{fact} – суммарный годовой пробег транспортных средств категории p на участках дорог с измеренной интенсивностью движения; ML_p^{model} – суммарный годовой пробег транспортных средств категории p на участках дорог со смоделированной интенсивностью движения.

Оценка выбросов на основании смоделированного пробега была выполнена с использованием метода удельных показателей отдельно для каждой ячейки целевой сетки, который может быть представлен уравнением

$$E_i^j = \sum_p ML_{i,p} EF_p^j, \quad (4)$$

где E_i^j – годовые выбросы от автомобильного транспорта вещества j в пределах ячейки i ; $ML_{i,p}$ – годовой пробег автомобильных транспортных средств категории p в пределах ячейки i ; EF_p^j – удельный показатель выбросов вещества j от автомобильных транспортных средств категории p . Значения удельных показателей получены на основании моделирования суммарных годовых выбросов с использованием модели COPERT в пределах страны в целом для рассматриваемого года [24] (табл. 2).

Таблица 2. Удельные показатели выбросов от автомобильного транспорта, т/маш·км

Table 2. Emission factors from road transport, t/vehicle·km

Категория автомобильного транспорта	Загрязняющее вещество			
	CO	NO _x	НМЛОС	ВЧ2.5
Автобусы (HDB)	1,71E-06	7,39E-06	8,48E-07	2,52E-07
Грузовые автомобили (HDT)	1,56E-06	6,09E-06	1,18E-06	2,07E-07
Легковые автомобили (LD4C)	6,41E-06	5,74E-07	1,28E-06	4,36E-08
Малые коммерческие автомобили, микроавтобусы (LD4T)	7,99E-06	8,90E-07	9,87E-07	8,94E-08
Мотоциклы (LD2)	8,67E-06	3,46E-08	5,07E-06	6,02E-08

Результаты и их обсуждение.

Пробег автомобильного транспорта. Суммарный годовой пробег на территории Беларуси, согласно выполненной оценке, составляет 27,750 млрд маш·км. Большая часть пробега (64,6 %) приурочена к крупным дорогам республиканского значения (основные дороги), на которых выполняются замеры интенсивности и структуры транспортного потока. В суммарной структуре транспортного потока преобладают легковые автомобили, суммарный годовой пробег транспорта этой категории составляет 19,490 млрд маш·км (70,2 %). Микроавтобусы и грузовые автомобили формируют в среднем 11,7

и 14,8 % суммарного годового пробега транспорта в стране соответственно. При этом основные и второстепенные дороги различаются по категориальной структуре: для основных дорог характерна более высокая, чем в среднем в стране, доля малых коммерческих и грузовых автомобилей (15,5 и 19,0 % соответственно), за счет более низкой доли легковых автомобилей и автобусов (64,4 и 0,9 % соответственно). На второстепенных дорогах легковые автомобили формируют 80,9 % общего пробега, вклад автобусов составляет 4,6 %, тогда как доля грузовых автомобилей снижена до 7,1 %, микроавтобусов – до 4,7 %. С учетом картографической протяженности дорог средняя расчетная интенсивность движения на всех дорогах страны составляет 330 ед/сут, в том числе на основных дорогах – 3164 ед/сут. Рассчитанный суммарный годовой пробег соответствует среднегодовому пробегу единичного транспортного средства 7349 км/год, в том числе 11 714 км/год для грузовых и 6755 км/год для легковых автомобилей.

С учетом используемой для всей территории страны сетки 1 км × 1 км выбросы от автомобильного транспорта происходят с площади 123,967 тыс. км², что соответствует 59,1 % территории страны. Для большей части территории, где происходят выбросы от автомобильного транспорта, суммарный годовой пробег не превышает 1000 маш·км (66,462 тыс. км²). На площади 18,001 тыс. км² пробег находится в диапазоне 1000–10000 маш·км, на площади 16,029 тыс. км² – от 10 до 100 тыс., на площади 16,840 тыс. км² – от 100 до 1000 тыс. и на площади 6,635 тыс. км² – свыше 1000 тыс. маш·км. При этом на участки с наибольшим пробегом (свыше 1000 тыс. маш·км) приходится более 70 % суммарного пробега транспорта. Наибольшая суммарная интенсивность движения отмечена в районе Минской кольцевой автомобильной дороги, пересечения магистралей международного значения вблизи столицы и областных центров, а также других крупных городов (Бобруйска, Жлобина, Молодечно, Орши, Полоцка, Новополоцка, Солигорска, Лиды). Наиболее высокое значение суммарного годового пробега автомобильного транспорта в пределах ячеек сетки 1 км × 1 км согласно выполненному моделированию составляет 66247 тыс. маш·км, оно отмечается в Минске на участке в районе пересечения МКАД и пр. Дзержинского. Для сравнения, вблизи областных центров наиболее высокие интенсивности движения составляют: в Бресте – 14 588 тыс. маш·км, в Гродно – 6960 тыс., в Витебске – 5515 тыс., в Могилёве – 9442 тыс., в Гомеле – 7187 тыс. маш·км.

Структура выбросов. Согласно выполненной оценке выбросов от автомобильного транспорта суммарно они составили: СО – 147,930 тыс. т, NO_x – 43,202 тыс., НМЛОС – 16,548 тыс., ВЧ2.5 – 2,199 тыс. т. С учетом используемого пространственного разрешения плотность выбросов (для территорий покрытых дорожной сетью) СО варьирует в диапазоне до 372,3 т/км², NO_x – до 87,2, НМЛОС – до 40,2, ВЧ2.5 – до 4,5 т/км². Пространственная вариабельность выбросов для различных загрязняющих веществ, выраженная в коэффициенте асимметрии распределения, сходна и характеризуется слабо выраженным ростом в ряду ВЧ2.5 (20,1) – NO_x (20,3) – НМЛОС (22,1) – СО (22,4) (табл. 3).

Таблица 3. Статистические характеристики пространственной структуры выбросов от автомобильного транспорта в Беларуси

Table 3. Statistical characteristics of the spatial structure of emissions from road transport in Belarus

Показатель	СО	NO _x	ВЧ2.5	НМЛОС
Плотность выбросов, кг/км ² :				
средняя	1193,7	349,3	18,5	133,9
медиана	3,7	1,0	0,1	0,4
максимум	372 307,4	87 152,5	4498,5	40 272,0
коэффициент асимметрии	22,4	20,3	20,1	22,1
коэффициент вариабельности, %	609	514	507	594
Площадь, покрытая дорожной сетью с выбросами выше среднего, км ²	17 966	18 069	17 824	18 040
Доля площади, покрытой дорожной сетью с выбросами выше среднего, %	14,5	14,6	14,4	14,6
Площадь (км ²) с выбросами (кг/км ²):				
[0, 0.1)	5571	17 202	64 560	33 633
[0.1, 1)	31 221	44 422	17 245	37 255
[1, 10)	35 368	19 805	15 261	17 183
[10, 100)	17 206	16 464	16 117	15 340
[100, 1000)	15 317	15 544	5507	16 499
[1000, 10000)	16 167	9807	149	3536
[10000, 100000)	2939	424	–	151
[100000, Inf)	136	–	–	–

Наибольшее количество выбросов загрязняющих веществ от автомобильного транспорта выбрасывается вблизи столицы и крупнейших городов в местах пересечения дорог первостепенного значения. Максимумы приурочены к пересечению МКАД (М9) с Р-1 (съезд с пр. Дзержинского) и М-4 (пересечение с пр. Партизанским) (рис. 1). Плотность выбросов NO_x от автомобильного транспорта в Беларуси свыше 10 т/км^2 характерна для территории общей площадью 424 км^2 , CO – 3075 км^2 , НМЛОС – 151 км^2 .

Полученная оценка позволяет оценить территориальную структуру выбросов с используемым разрешением в пределах отдельных административных районов и населенных пунктов. В частности, как показано на рис. 2, в Лепельском районе выбросы ВЧ2.5 от автомобильного транспорта происходят с территории площадью $0,973 \text{ км}^2$, что соответствует $52,8 \%$ площади данного административного района. В пределах участков района, где происходят выбросы от автомобильного транспорта, их плотность находится в диапазоне от $0,001$ до $408,1 \text{ кг/км}^2$; участки с плотностью выбросов выше 1000 кг/км^2 . Площади с различными уровнями выбросов ВЧ2.5 распределены следующим образом: до $0,1 \text{ кг/км}^2$ – $0,561 \text{ км}^2$, $0,1\text{--}1,0 \text{ кг/км}^2$ – $0,142$, $1,0\text{--}10,0 \text{ кг/км}^2$ – $0,106$, $10,0\text{--}100,0 \text{ кг/км}^2$ – $0,133$, свыше 100 кг/км^2 – $0,073 \text{ км}^2$. Наибольшие выбросы ВЧ2.5 от автомобильного транспорта в Лепельском районе, согласно выполненному исследованию, характерны для пересечения дорог Р-15 и М-3 на юг от Лепеля, участка дороги М-3 на запад от города (см. рис. 2).

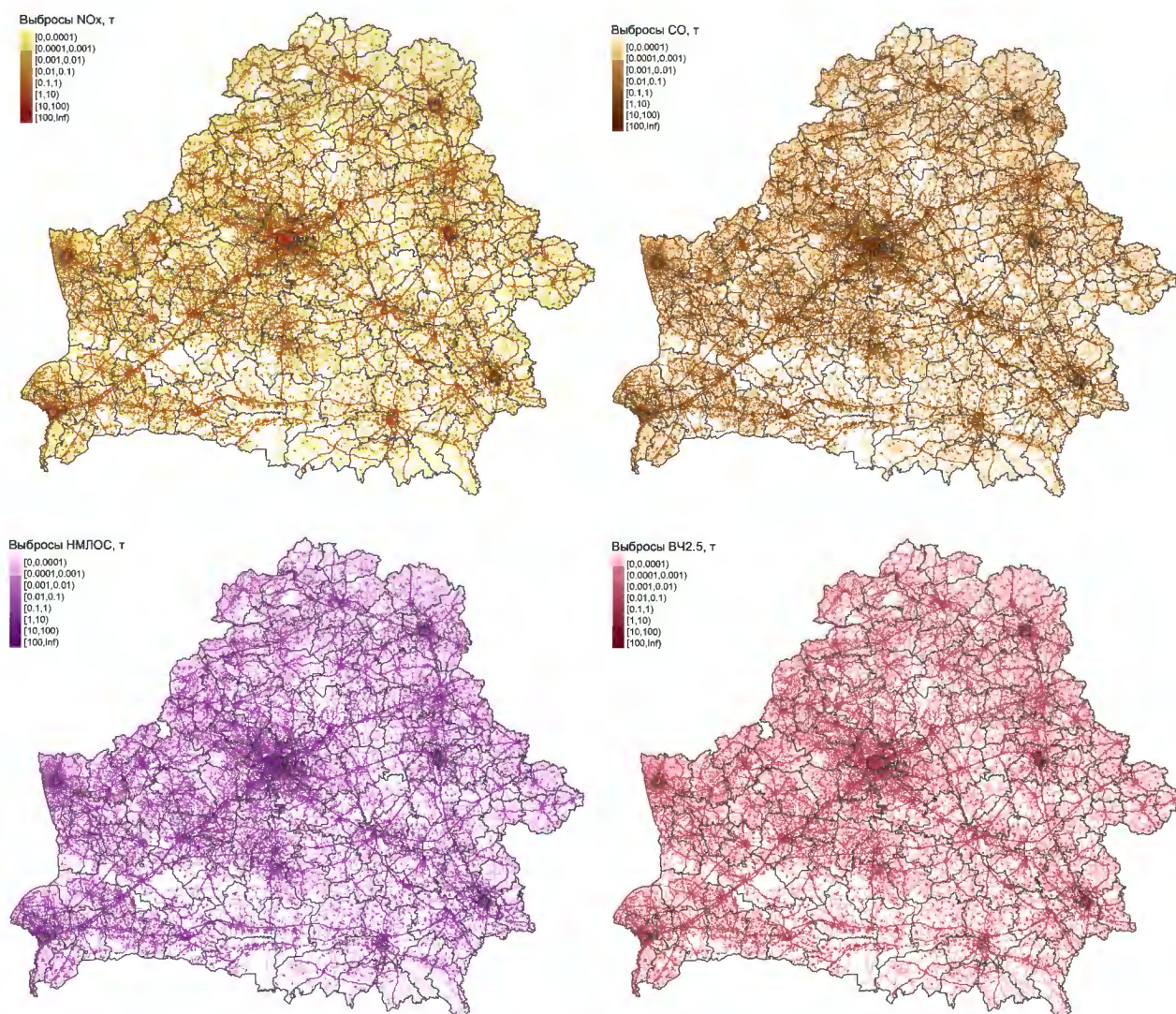


Рис. 1. Пространственная структура выбросов загрязняющих веществ (CO , NO_x , НМЛОС , ВЧ2.5) от автомобильного транспорта в Беларуси

Fig. 1. Spatial structure of emissions of pollutants (CO , NO_x , NMVOCs , $\text{PM}_{2.5}$) from road transport in Belarus

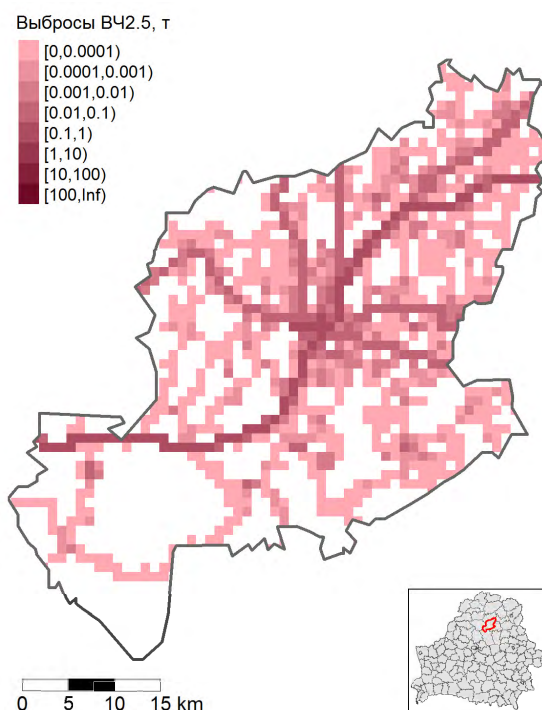


Рис. 2. Пространственная структура выбросов ВЧ2.5 от автомобильного транспорта в Лепельском районе

Fig. 2. Spatial structure of PM_{2.5} emissions from road transport in Lepel district

На всей территории страны на дорогах первостепенного значения выбрасывается большая часть рассматриваемых загрязняющих веществ от автомобильного транспорта: СО – 94,897 тыс. т (или 64,1 % от общего количества), NO_x – 30,815 тыс. (или 71,3), НМЛОС – 10,642 тыс. (64,3), ВЧ2.5 – 1,570 тыс. т (или 71,4 %). С учетом протяженности дорог различных категорий на 1 км дорог первостепенного значения в среднем приходится: СО – 5,29 т/млн маш·км, NO_x – 1,72, НМЛОС – 0,597, ВЧ2.5 – 0,088 т/млн маш·км. Дороги второстепенного значения характеризуются незначительно более высокими значениями приведенных выбросов СО и НМЛОС (на 1,9 и 0,5 % соответственно), а также более низкими значениями выбросов NO_x и ВЧ2.5. Это связано с различиями в средней структуре транспортных потоков по категориям транспортных средств, в частности, более высокой долей легковых автомобилей на дорогах второстепенного значения, около половины из которых работают на бензине и характеризуются более высокими удельными показателями выбросов СО и НМЛОС. При этом на 1 км дороги первостепенного значения приходятся значительно более высокие средние значения выбросов, чем на дороги второстепенного значения, что обусловлено различной интенсивностью движения. В частности, на первостепенных дорогах по сравнению с второстепенными на единицу длины выбрасывается в 24,9 раза больше СО, в 34,5 раза больше NO_x, в 34,7 раза больше ВЧ2.5 и в 25,1 раза больше НМЛОС.

Основной вклад в выбросы СО и НМЛОС вносят многочисленная и в значительной степени оснащенная бензиновыми двигателями категория легковых автомобилей. Они формируют 78,8 % выбросов СО (в том числе 72,7 % на дорогах первостепенного значения и 89,8 % на дорогах второстепенного значения) и 74,7 % выбросов НМЛОС (в том числе 68,7 % на дорогах первостепенного значения и 85,4 % на дорогах второстепенного значения). Другой значимой категорией транспорта для выбросов этих загрязняющих веществ являются микроавтобусы, формирующие 15,9 и 14,0 % выбросов СО и НМЛОС соответственно (рис. 3).

Мелкодисперсные твердые частицы ВЧ2.5 и NO_x поступают в атмосферный воздух в наибольшем количестве от грузовых автомобилей. Вклад этой категории в выбросы ВЧ2.5 от автомобильного транспорта составляют 52,8 % (в том числе 61,3 % на дорогах первостепенного значения и 31,5 % на дорогах второстепенного значения) и NO_x – 58,0 % (в том числе 67,5 % на дорогах первостепенного значения и 34,5 % на дорогах второстепенного значения). При этом на дорогах второстепенного значения от легковых автомобилей выбрасывается больше ВЧ2.5 и NO_x, чем от грузовых – 35,8 и 35,4 % соответственно. Тогда как среднестрановой вклад легковых автомобилей в выбросы от автомобильного транспорта на дорогах всех категорий составляет 24,9 % для NO_x и 25,1 % для ВЧ2.5. Сходная категориальная структура формирования выбросов NO_x и СО показана в исследованиях [30].

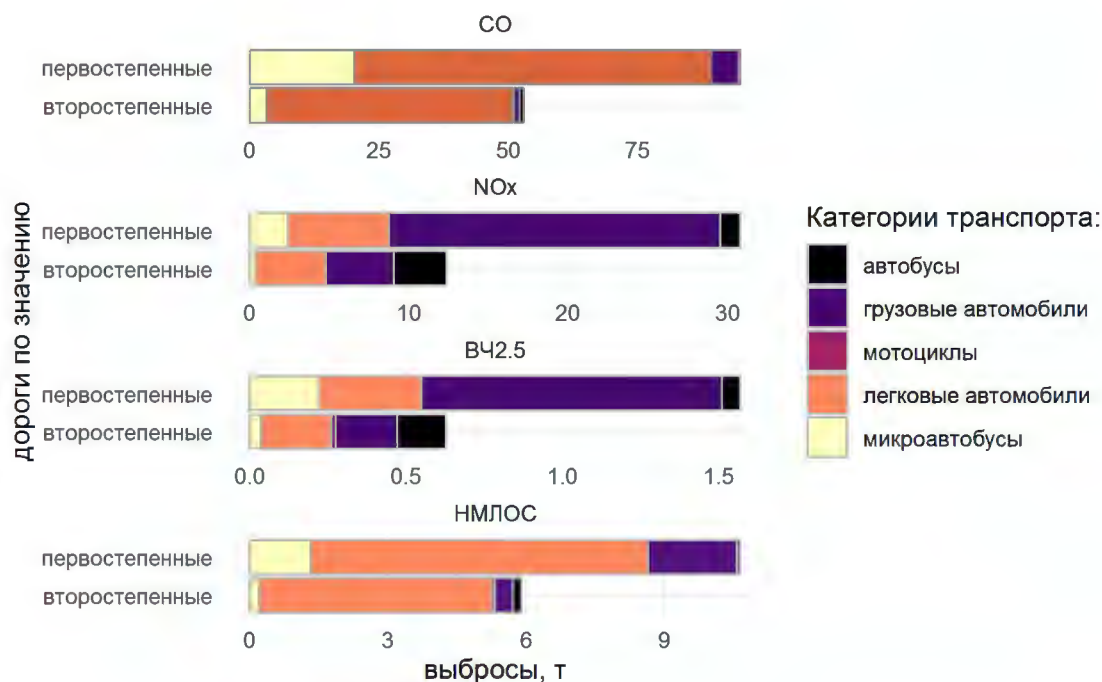


Рис. 3. Структура выбросов загрязняющих веществ в разрезе категорий транспорта и дорог

Fig. 3. Structure of emissions of pollutants by categories of transport and roads

Дороги первостепенного значения характеризуются более высоким уровнем выбросов BЧ_{2.5} и NO_x, на второстепенных больше, чем в среднем в стране, выбрасывается CO и НМЛОС. На дорогах первостепенного значения на 1 т выбросов BЧ_{2.5} приходится 7 т НМЛОС, 20,3 т NO_x и 62,6 т CO, тогда как дороги второстепенного значения характеризуются следующим соотношением этих поллютантов: 1,0 : 9,1 : 19,1 : 81,9.

В территориальной структуре выбросов от автомобильного транспорта присутствует выраженная концентрация на урбанизированных территориях. Так, на урбанизированных территориях, занимающих менее 2 % территории страны, выбрасывается: CO – 58,118 тыс. т (или 39,3 %), NO_x – 14,269 тыс. т (или 33,0), НМЛОС – 6,410 тыс. т (или 38,7), BЧ_{2.5} – 0,729 тыс. т (или 33,2 %) (рис. 4). Более высокие доли выбросов CO и НМЛОС на урбанизированных территориях относительно других рассматриваемых поллютантов объясняются более высоким вкладом легковых автомобилей в структуру суммарного годового пробега.

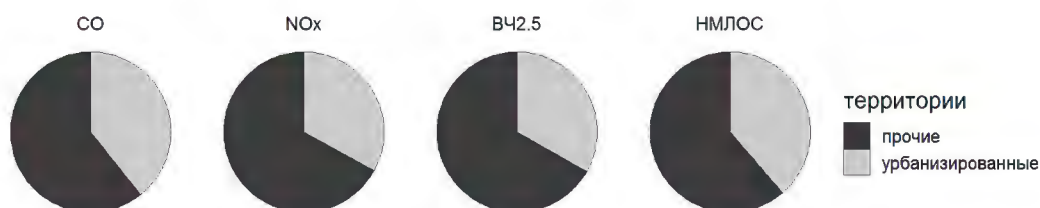


Рис. 4. Структура выбросов загрязняющих веществ по территориям

Fig. 4. Structure of emissions of pollutants by territories

С учетом занимаемых площадей средняя плотность выбросов на урбанизированных территориях составляет: CO – 19,07 т/км², NO_x – 4,68, НМЛОС – 2,10, BЧ_{2.5} – 0,24 т/км²; на прочих территориях наблюдаются значительно более низкие значения: CO – 0,44 т/км², NO_x – 0,14, НМЛОС – 0,05, BЧ_{2.5} – 0,01 т/км² (рис. 5).

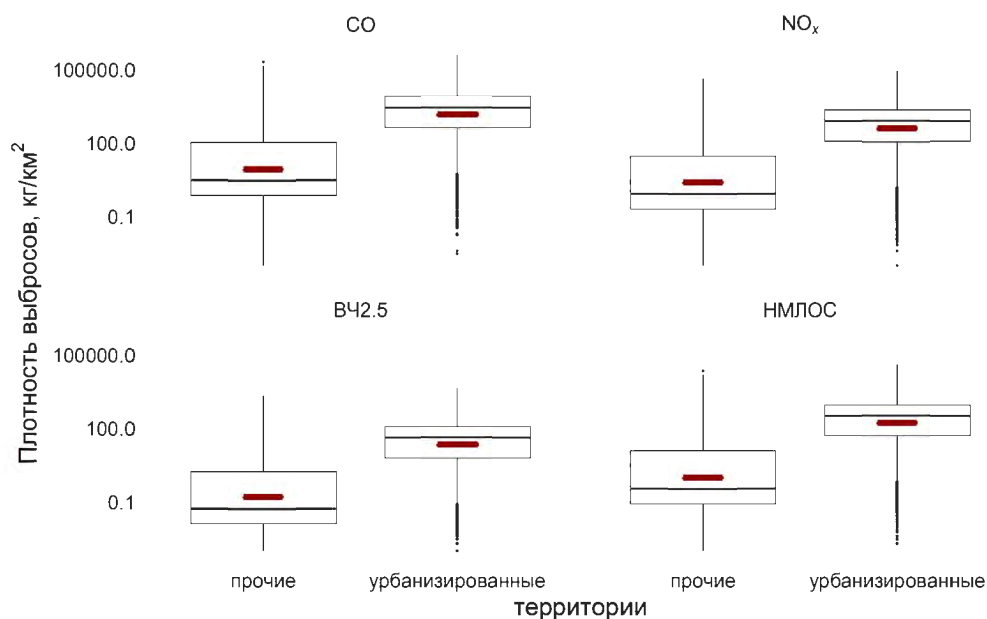


Рис. 5. Распределение плотности выбросов загрязняющих веществ от автомобильного транспорта на урбанизированных и прочих территориях (логарифмическая шкала, бордовая линия – среднее значение)

Fig. 5. Distribution of pollutant emission density from road transport in urbanized and other areas (logarithmic scale, red line represents the average value)

Для урбанизированных территорий характерны также более высокие медианные и максимальные значения плотности выбросов. Различие максимальных значений составляет около 2 раз, тогда как медианные значения для урбанизированных территорий в 815–993 раз выше, чем для прочих. Тем не менее в пределах урбанизированных территорий есть участки целевого разрешения 1 км × 1 км, на которых выбросы от автомобильного транспорта не происходят.

Обсуждение результатов. Представленная выше оценка с пространственным разрешением 1 км × 1 км для автомобильного транспорта получена для территории Беларуси впервые, что затрудняет сопоставления.

По сравнению с оценкой с пространственным разрешением 0,1° × 0,1° [23], выполненной по состоянию на 2017 г., выявлены и оценены территории, где выбросы от автомобильного транспорта отсутствуют. При большем пространственном обобщении такие участки не выявляются, равно как и участки с высокой плотностью. Кроме того, при оценке с пространственным разрешением 0,1° × 0,1° в Беларуси преобладают территории с плотностью выбросов CO в диапазоне 100–1000 кг/км², тогда как при большей пространственной детализации – в диапазоне 1–10 кг/км². Для других рассматриваемых поллютантов при более детализированной оценке преобладающими также являются территории с диапазоном выбросов на два порядка меньше. Большая детализация проявляется также в соотношении медианных и средних значений выбросов. При оценке с пространственным разрешением 0,1° × 0,1° для NO_x среднее значение в 3,9 раза выше, чем медианное, при разрешении 1 км × 1 км это соотношение составляет более 300 (табл. 4).

Существенным улучшением представленной оценки является также учет пространственной неоднородности движения транспортных средств различных категорий, проявляющееся в том числе в отличиях статистических характеристик, а именно коэффициентов асимметрии и вариабельности. При оценке с пространственным разрешением 0,1° × 0,1° по единому пространственному прокси получены одинаковые значения этих показателей для всех загрязняющих веществ.

Вместе с тем имеющиеся немногочисленные исследования для других стран, выполненные в сопоставимом пространственно-временном разрешении и для пересекающегося перечня загрязняющих веществ, позволяют оценить выявленные в данной работе особенности. Для корректного сопоставления регионов с различными суммарными показателями ниже приведены сопоставления результирующей плотности выбросов и соотношения плотностей выбросов на урбанизированных и прочих территориях.

Таблица 4. Статистические характеристики территориальной структуры выбросов от автомобильного транспорта в Беларуси при оценке с пространственным разрешением $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (2017 г., по данным [23])

Table 4. Statistical characteristics of the territorial structure of emissions from road transport in Belarus with a spatial resolution of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (2017, based on [23] data)

Показатель	CO	NO _x	BЧ2.5	НМЛОС
Плотность выбросов, кг/км ² :				
средняя	392,3	149,4	6,65	44,6
медиана	101,5	38,6	1,72	11,5
максимум	75 880	28 892	1287	8627
коэффициент асимметрии	21,8	21,8	21,8	21,8
коэффициент вариабельности, %	703,0	703,0	703,0	703,0
Площадь, покрытая дорожной сетью с выбросами выше среднего, км ²	41 941	41 941	41 941	41 941
Доля площади, покрытой дорожной сетью с выбросами выше среднего, %	20,2	20,2	20,2	20,2
Площадь (км ²) с выбросами в диапазоне (кг/км ²):				
[0,0.1)	427	784	8761	1994
[0.1,1)	1709	4131	79 490	11 396
[1,10)	12 963	41 597	93 237	86 897
[10,100)	88 393	101 143	25 571	92 168
[100,1000)	91 456	58 122	427	14 673
[1000,10000)	12 180	1425	142	499
[10000,100000)	499	427	0	0
[100000,Inf)	0	0	0	0

В отдельных городах региона Северный Рейн-Вестфалия (Германия), согласно [18], плотность NO_x от автомобильного транспорта находится в диапазоне 7,0–15,6 т/км², при преобладающей плотности выбросов для всего региона менее 2,5 т/км² и максимальной плотности 126,0 т/км². Такое значение для Германии преимущественно на 50 % выше, чем для Беларуси, однако соотношения между максимальными и средними значениями сходны в большей степени (16,8 и 18,6 соответственно).

Максимальная плотность выбросов в Греции для CO составляет около 550 т/км², для NO_x – 100, для BЧ2.5 – 4,5, для НМЛОС – 125 т/км² [12], что выше, чем в настоящем исследовании для Беларуси. Различие в оценках для NO_x и BЧ2.5 составляет 10 %, для CO и НМЛОС – 46 и 310 % соответственно. Соотношения между плотностями выбросов на урбанизированных и прочих территориях при этом сходны.

В то же время полученные оценки плотности выбросов значительно ниже, чем на в азиатском регионе. В частности, максимальной плотности выбросов CO в Беларуси соответствует среднее значение для территории Пекина с высокой интенсивностью движения, а для NO_x и BЧ2.5 оно значительно ниже, согласно [20]. В то же время, согласно [10], в мегаполисах Индии средняя годовая плотность выбросов CO находится в диапазоне 35,3–246,3 т/км², а NO_x – 21,4–144,9 т/км², что на несколько порядков превосходит значения для урбанизированных территорий Беларуси.

Полученные максимальные значения сходны со средней плотностью выбросов в густонаселенных урбанизированных районах Аргентины [31] для CO и в 2 раза ниже для NO_x. При этом отмечается несколько более низкая, чем в Беларуси, степень концентрации плотности выбросов на урбанизированных территориях: соотношение средних плотностей выбросов на урбанизированных и прочих территориях составляет 35,7 для CO и 32,2 для NO_x, в Беларуси – 43,3 и 33,4 соответственно.

Заключение. Выполненное исследование позволило впервые для Беларуси оценить пространственную структуру выбросов отдельных загрязняющих веществ (BЧ2.5, НМЛОС, CO, NO_x) а также основного количественного фактора ее формирующего (суммарного пробега транспортных средств) с разрешением 1 км. С учетом используемого пространственного разрешения установлено, что дорожной сетью покрыто 59,1 % территории страны, а максимальная плотность выбросов от автомобильного транспорта на территории Беларуси составляет 372,3 т/км² для CO, 87,2 т/км² для NO_x, 40,2 т/км² для НМЛОС и 4,5 т/км² BЧ2.5. Пространственная неоднородность выбросов высока и характеризуется коэффициентом асимметрии распределения в диапазоне 20,1–22,4 для различных поллютантов.

Наибольшее количество выбросов приурочено к крупнейшим городам и местам пересечения дорог первостепенного значения. Для около 85,5 % территории страны, покрытой дорожной сетью, выбросы СО не превышают 1,194 т/км², NO_x – 0,349, НМЛОС – 0,134, ВЧ2.5 – 0,019 т/км².

Выявлено, что около 1/3 части выбросов (от 33,0 до 39,3 %, в зависимости от вещества) приходится на урбанизированные территории. Соответственно, в городах наблюдается более высокая плотность выбросов, как в среднем, так и максимальная. Среднее значение плотности выбросов СО составляет 10,99 т/км² на урбанизированных территориях и 0,76 т/км² на прочих, NO_x – 2,70 и 0,24 т/км², НМЛОС – 1,21 и 0,09 т/км², ВЧ2.5 – 0,14 и 0,01 т/км² соответственно. Максимальные значения на урбанизированных превышают аналогичные на прочих территориях в 2 раза. Сходные соотношения между выбросами в зависимости от территории получены для других стран.

Полученные результаты уточняют имевшиеся ранее пространственные оценки выбросов от автомобильного транспорта и предназначены для непосредственного использования при принятии управленческих решений в области охраны атмосферного воздуха, а также для моделирования рассеивания загрязняющих веществ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограммы «Природные ресурсы и их рациональное использование»; № госрегистрации 20160130.

Acknowledgements. The study has been performed within The State program of scientific research «Nature management and ecology», subprogram «Natural resources and environmental safety»; state registration no. 20160130.

Список использованных источников

1. A methodology for high resolution vehicular emissions inventories in metropolitan areas: automotive technologies improvement / A. de S. Maes [et al.] // *Transportation Research Part D : Transport and Environment*. – 2019. – № 77. – P. 303–19. doi:10.1016/j.trd.2019.10.007
2. A comparative analysis of two highly spatially resolved European atmospheric emission inventories / J. Ferreira [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2013. – № 75. – P. 43–57. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.03.052
3. Spatial inter-comparison of Top-down emission inventories in European urban areas / M. Trombetti [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2018. – № 173. – P. 142–56. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.10.032
4. Comparison of road traffic emission models in Madrid (Spain) / R. Borge [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2012. – № 62. – P. 461–71. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.08.073
5. Spatial disaggregation of traffic emission inventories in large cities using simplified top-down methods / P. De. Saide, [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2009. – № 43. – P. 4914–23. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.07.013
6. Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities / D. Tuia [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2007. – № 41. – P. 3658–71. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.12.045
7. Инструкция о порядке учета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от мобильных источников выбросов [Электронный ресурс] : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 15 февр. 2010 г., № 6 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W21022110>. – Дата доступа: 04.01.2023.
8. Об утверждении экологических норм и правил [Электронный ресурс] : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 29 дек. 2022 г., № 32-Т // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22339600p&p1=1> – Дата доступа: 18.06.2023.
9. Интерактивная информационно-аналитическая система распространения официальной статистической информации [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://dataportal.belstat.gov.by/>. – Дата доступа: 22.01.2022.
10. A comprehensive high-resolution gridded emission inventory of anthropogenic sources of air pollutants in Indian megacity Kolkata / P. Mangaraj [et al.] // *SN Applied Sciences*, Springer International Publishing. – 2022. – № 4. doi:10.1007/s42452-022-05001-3
11. Downscaling national road transport emission to street level: A case study in Dublin, Ireland / M. S. Alam [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – № 183. – P. 797–809. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.206
12. Fameli, K. M. Development of a road transport emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of important parameters / K. M. Fameli, V. D. Assimakopoulos // *Science of the Total Environment*. – 2015. – № 505. – P. 770–86. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.10.015
13. Quantifying and spatial disaggregation of air pollution emissions from ground transportation in a developing country context: Case study for the Lima Metropolitan Area in Peru / Y. Romero [et al.] // *The Science of the Total Environment*. – 2020. – № 698.
14. Sun, S. Vehicle emission trends and spatial distribution in Shandong province, China, from 2000 to 2014 / S. Sun, W. Jiang, W. Gao // *Atmospheric Environment*. – 2016. – № 147. – P. 190–9. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.09.065

15. Improving high resolution emission inventories with local proxies and urban eddy covariance flux measurements / B. Gioli [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2015. – № 115. – P. 246–56. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.068>
16. An improved system for modelling Spanish emissions: HERMESv2.0 / M. Guevara [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2013. – № 81. – P. 209–21. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.08.053
17. A bottom up approach to on-road CO₂ emissions estimates: Improved spatial accuracy and applications for regional planning / C. K. Gately [et al.] // *Environmental Science and Technology*. – 2013. – № 47. – P. 2423–30. doi:10.1021/es304238v
18. The impact of diesel vehicles on NO_x and PM₁₀ emissions from road transport in urban morphological zones: A case study in North Rhine-Westphalia, Germany / J. L. Breuer [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2020. – № 727. – P. 138583. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138583
19. Compilation of a road transport emission inventory for the Province of Turin: Advantages and key factors of a bottom-up approach / L. Pallavidino [et al.] // *Atmospheric Pollution Research*. – 2014. – № 5. – P. 648–55. doi:10.5094/APR.2014.074
20. High-resolution mapping of vehicle emissions of atmospheric pollutants based on large-scale, real-world traffic datasets / D. Yang [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2019. – № 19. – P. 8831–43. doi:10.5194/acp-19-8831-2019
21. Assessment of discrepancies between bottom-up and regional emission inventories in Norwegian urban areas / S. López-Aparicio [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2017. – № 154. – P. 285–96. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.02.004
22. European Environment Agency European Union emission inventory report 1990–2021 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). EEA Tech. Rep. 2023 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-emissions-inventory-report-1990-2021/download>. – Date of access: 18.05.2023.
23. Belarusian emission inventory data informative inventory report to CLRTAP/EMEP 2020 [Electronic resource]. – Mode of access: https://webdab01.umweltbundesamt.at/download/submissions_2020/BY_IIR2020.zip?cgiproxy_skip=1. – Date of access: 14.01.2023.
24. Validation of the COPERT road emission inventory model with real-use data / M. Kousoulidou [et al.] // *Emissions Inventories-Informing Emerging Issues*. – 2010. – P. 40.
25. Какарека, С. В. Оценка выбросов загрязняющих веществ от дорожных передвижных источников с использованием модели COPERT IV / С. В. Какарека, О. Ю. Круковская // *Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера* : сб. науч. тр. ; под. ред. А. Ю. Недре. – СПб., 2013. – С. 35–41.
26. РУП «БЕЛДОРЦЕНТР» – Республиканское унитарное предприятие «Белорусский дорожный инженерно-технический центр» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://beldor.centr.by/>. – Дата доступа: 12.01.2021.
27. OpenStreetMap [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.openstreetmap.org/#map=10>. – Date of access: 12.04.2023.
28. Climate Data Online: Web Services Documentation / National Center Environmental Information [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/>. – Date of access: 15.04.2023.
29. Global 10 m Land Use Land Cover Datasets: A Comparison of Dynamic World, World Cover and Esri Land Cover / Z. S. Venter [et al.] // *Remote Sensing*. – 2022. – № 14. – P. 4101. doi:10.3390/rs14164101
30. A GIS based anthropogenic PM₁₀ emission inventory for Greece / K. Markakis [et al.] // *Atmospheric Pollution Research*. – 2010. – № 1. – P. 71–81. doi:10.5094/APR.2010.010
31. High-resolution seasonal and decadal inventory of anthropogenic gas-phase and particle emissions for Argentina / S. E. Puliafito [et al.] // *Earth System Science Data*. – 2021. – № 13. – P. 5027–69. doi:10.5194/essd-13-5027-2021

References

1. Maes A. de S., Hoinaski L., Meirelles T. B. and Carlson R. C. A methodology for high resolution vehicular emissions inventories in metropolitan areas: automotive technologies improvement. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2019, no. 77, pp. 303–19. doi:10.1016/j.trd.2019.10.007
2. Ferreira J. [et al.]. A comparative analysis of two highly spatially resolved European atmospheric emission inventories. *Atmospheric Environment*, 2013, no. 75, pp. 43–57. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.03.052
3. Trombetti M. [et al.]. Spatial inter-comparison of Top-down emission inventories in European urban areas. *Atmospheric Environment*, 2018, no. 173, pp. 142–56. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.10.032
4. Borge R. [et al.]. Comparison of road traffic emission models in Madrid (Spain). *Atmospheric Environment*, 2012, no. 62, pp. 461–71. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.08.073
5. Saide P., Zah R., Osses M., Eicker M.O. De Spatial disaggregation of traffic emission inventories in large cities using simplified top-down methods. *Atmospheric Environment*, 2009, no. 43, pp. 4914–23. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.07.013
6. Tuia D. [et al.]. Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities. *Atmospheric Environment*, 2007, no. 41, pp. 3658–71. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.12.045
7. *Instruktsiya o poryadke ucheta vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferynyy vozdukh ot mobil'nykh istochnikov vybrosov : postanovleniye Ministerstva prirodnnykh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus' № 6 ot 15.02.2010* [Instructions on the procedure for recording emissions of pollutants into the atmospheric air from mobile emission sources. Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of

- the Republic of Belarus, 15 February 2010, no. 6]. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W21022110> (accessed 4 January 2023). (in Russian)
8. *Ob utverzhdenii ekologicheskikh norm i pravil: postanovleniye Ministerstva prirodnnykh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus' ot 29 dekabrya 2022 g. № 32-T* [On the approval of environmental norms and rules. Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 29 December 2022, no. 32-T]. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22339600p&p1=1> (accessed 18 June 2023). (in Russian)
 9. *Interaktivnaya informatsionno-analiticheskaya sistema rasprostraneniya ofitsial'noy statisticheskoy informatsii: Natsional'nyy statisticheskiy komitet Respubliki Belarus'* [Interactive information and analytical system for disseminating official statistical information]. National Statistical Committee of the Republic of Belarus. Available at: <http://dataportal.belstat.gov.by/> (accessed 22 January 2022). (in Russian)
 10. Mangaraj P., Sahu S. K., Beig G., Yadav R. A comprehensive high-resolution gridded emission inventory of anthropogenic sources of air pollutants in Indian megacity Kolkata. *SN Applied Sciences*, 2022, no. 4. doi:10.1007/s42452-022-05001-3
 11. Alam M. S., Duffy P., Hyde B., McNabola A. Downscaling national road transport emission to street level: A case study in Dublin, Ireland. *Journal of Cleaner Production*, 2018, no. 183, pp. 797–809. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.206
 12. Fameli K. M., Assimakopoulos V. D. Development of a road transport emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of important parameters. *Science of the Total Environment*, 2015, no. 505, pp. 770–86. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.10.015
 13. Romero Y. [et al.]. Quantifying and spatial disaggregation of air pollution emissions from ground transportation in a developing country context: Case study for the Lima Metropolitan Area in Peru. *The Science of the Total Environment*, 2020, no. 698.
 14. Sun S., Jiang W., Gao W. Vehicle emission trends and spatial distribution in Shandong province, China, from 2000 to 2014. *Atmospheric Environment*, 2016, no. 147, pp. 190–9. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.09.065
 15. Gioli B. [et al.]. Improving high resolution emission inventories with local proxies and urban eddy covariance flux measurements. *Atmospheric Environment*, 2015, no. 115, pp. 246–56. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.05.068
 16. Guevara M. [et al.]. An improved system for modelling Spanish emissions: HERMESv2.0. *Atmospheric Environment*, 2013, no. 81, pp. 209–21. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.08.053
 17. Gately C. K., Hutrya L. R., Wing I. S., Brondfield M. N. A bottom up approach to on-road CO₂ emissions estimates: Improved spatial accuracy and applications for regional planning. *Environmental Science and Technology*, 2013, no. 47, pp. 2423–30. doi:10.1021/es304238v
 18. Breuer J. L., Samsun R. C., Peters R., Stolten D. The impact of diesel vehicles on NO_x and PM₁₀ emissions from road transport in urban morphological zones: A case study in North Rhine-Westphalia, Germany. *Science of the Total Environment*, 2020, no. 727, pp. 138583. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138583
 19. Pallavidino L. [et al.]. Compilation of a road transport emission inventory for the Province of Turin: Advantages and key factors of a bottom-up approach. *Atmospheric Pollution Research*, 2014, no. 5, pp. 648–55. doi:10.5094/APR.2014.074
 20. Yang D. [et al.]. High-resolution mapping of vehicle emissions of atmospheric pollutants based on large-scale, real-world traffic datasets. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, no. 19, pp. 8831–43. doi:10.5194/acp-19-8831-2019
 21. López-Aparicio S. [et al.]. Assessment of discrepancies between bottom-up and regional emission inventories in Norwegian urban areas. *Atmospheric Environment*, 2017, no. 154, pp. 285–96. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.02.004
 22. European Environment Agency European Union emission inventory report 1990–2021 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). EEA Tech. Rep. 2023. Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-emissions-inventory-report-1990-2021/download> (accessed 18 May 2023).
 23. Belarusian emission inventory data informative inventory report to CLRTAP/EMEP 2020. Available at: https://web-dab01.umweltbundesamt.at/download/submissions/2020/BY_IIR2020.zip?cgiproxy_skip=1 (accessed 14 January 2023).
 24. Kousoulidou M. [et al.]. Validation of the COPERT road emission inventory model with real-use data. *Emissions Inventories-Informing Emerging Issues*, 2010, p. 40.
 25. Kakareka S. V., Krukovskaya O. Yu. *Otsenka vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv ot dorozhnykh peredvizhnykh istochnikov s ispol'zovaniyem modeli COPERT IV* [Estimation of pollutant emissions from road mobile sources using the COPERT IV model]. Sbornik nauch. trudov "Okhrana atmosfernogo vozdukh. Atmosfera" [Proc. of sci. works "Atmospheric air protection"]. *Atmosphere*, 2013, pp. 35–41. (in Russian)
 26. RUP "BELDORTSENTR" – Respublikanskoye unitarnoye predpriyatiye "Belorusskiy dorozhnyy inzhenerno tekhnicheskiiy tsentr [RUE "BELDORTSENTR – Republican Unitary Enterprise "Belarusian Road Engineering and Technical Center"] [Electronic resource]. Available at: <https://beldor.centri.by/> (accessed 12 January 2021). (in Russian)
 27. OpenStreetMap (2023). Available at: <https://www.openstreetmap.org/#map=10> (accessed 12 April 2023).
 28. Climate Data Online: Web Services Documentation. National Center Environmental Information (2023). Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/> (accessed 15 April 2023).
 29. Venter Z. S. [et al.]. Global 10 m Land Use Land Cover Datasets: A Comparison of Dynamic World, World Cover and Esri Land Cover. *Remote Sensing*, 2022, no. 14, pp. 4101. doi:10.3390/rs14164101.
 30. Markakis K., Poupkou A., Melas D., Zerefos C. A GIS based anthropogenic PM₁₀ emission inventory for Greece. *Atmospheric Pollution Research*, 2010, no. 1, pp. 71–81. doi:10.5094/APR.2010.010.
 31. Puliafito S. E. [et al.]. High-resolution seasonal and decadal inventory of anthropogenic gas-phase and particle emissions for Argentina. *Earth System Science Data*, 2021, no. 13, pp. 5027–69. doi:10.5194/essd-13-5027-2021.

Информация об авторах

Круковская Ольга Юрьевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: o-krukowskaya@tut.by

Какарека Сергей Витальевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией трансграничного загрязнения, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: sk001@yandex.ru

Information about the authors

Olga Yu. Krukowskaya – 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: o-krukowskaya@tut.by

Sergey V. Kakareka – D. Sc. (Technical), Professor, Head of Lab of Transboundary Pollution, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: sk001@yandex.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-39-54>
УДК 553.97

Поступила в редакцию 23.09.2023
Received 23.09.2023

ЭМИССИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ С ТОРФЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЫГОНОЩАНСКОЕ НА УЧАСТКЕ С ПРЕОБЛАДАНИЕМ КРАПИВЫ ДВУДОМНОЙ

Т. Д. Ярмошук

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Изучены годовые балансы диоксида углерода, метана, закиси азота на торфяном месторождении Выгонощанское камерно-статическим и камерно-динамическим методами в условиях преобладания рудеральных синантропных растительных ассоциаций, преимущественно крапивы двудомной (*Urtica dioica*). Суммарный нетто-экосистемный обмен на изучаемой мониторинговой площадке составил 951,89 г С м⁻²·год⁻¹, абсорбция метана составила –0,16 г С м⁻²·год⁻¹, а эмиссии закиси азота равнялись 0,55 г N м⁻²·год⁻¹. Таким образом, в пересчете на СО₂-эквивалент и с учетом молярной массы, суммарный годовой баланс парниковых газов составил 40,17 т СО₂-экв. га⁻¹·год⁻¹. Сравнительная характеристика полученных результатов с аналогичными измерениями на мониторинговых площадках с преобладанием лугового разнотравья, канареечника (*Phalaris arudinacea*) и ситника (*Juncus effuses*) показала существенную зависимость потоков парниковых газов от уровня залегания грунтовых вод, мощности и состава торфяной залежи, сезонности и температурных факторов, а также от видового состава произрастающей растительности.

Ключевые слова: парниковые газы; диоксид углерода; метан; закись азота; торфяное месторождение; крапива; камерные методы.

Для цитирования. Ярмошук Т. Д. Эмиссия парниковых газов с торфяного месторождения Выгонощанское на участке с преобладанием крапивы двудомной // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 39–54.

GREENHOUSE GAS EMISSION FROM THE VYGONOSHCHANSKOE PEAT DEPOSIT AT THE SITE WITH A PREDOMINANCE OF DIOECIOUS NETTLE

T. D. Yarmoshuk

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

Abstract. The annual balances of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide at the Vygonoshchanskoye peat deposit were studied using chamber-static and chamber-dynamic methods under the predominance of ruderal synanthropic plant associations, mainly dioecious nettle (*Urtica dioica*). The total net ecosystem exchange at the studied monitoring site amounted to 951.89 g C m⁻² yr⁻¹, methane absorption amounted to –0.16 g C m⁻² yr⁻¹, and nitrous oxide emissions were 0.55 g N m⁻² yr⁻¹. Thus, in terms of CO₂-equivalent and taking into account the molar mass, the total annual greenhouse gas balance was 40.17 tons of CO₂-eq. ha⁻¹ yr⁻¹. A comparative characterization of the results obtained with similar measurements at monitoring sites with a predominance of meadow grasses, canary (*Phalaris arudinacea*) and sitnik (*Juncus effuses*) showed a significant dependence of greenhouse gas fluxes on the groundwater level, the thickness and composition of peat deposits, seasonality and temperature factors, as well as on the species composition of the growing vegetation.

Keywords: greenhouse gases; carbon dioxide; methane; nitrous oxide; peat deposit; nettle; chamber methods.

For citation. Yarmoshuk T. D. Greenhouse gas emission from the Vygonoshchanskoe peat deposit at the site with a predominance of dioecious nettle. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 39–54.

Введение. Балансовые потоки парниковых газов в настоящее время являются одной из наиболее остро стоящих глобальных проблем как с точки зрения вопросов глобального потепления и изменения климата, так и с позиции выполнения обязательств Республики Беларусь по сокращению выбросов парниковых газов к 2030 г. Большое количество зарубежных научных исследований выполнено с целью определения вклада в глобальный круговорот углерода и азота торфяных месторождений различного хозяйственного освоения и использования, однако все исследования различаются между собой по климатическим условиям отбора проб, уровню залегания грунтовых вод (УГВ), произрастающей растительности, физико-химическим и техническим свойствам торфа. Для нашего региона таких данных недостаточно, поэтому получение новых данных по эмиссии парниковых газов с торфяных месторождений Беларуси в естественном и осушенном состоянии весьма актуально.

Цель работы – определить эмиссии и абсорбции парниковых газов с территории, расположенной в зоне регулируемого хозяйственного пользования Республиканского ландшафтного заказника «Выгонощанское», а также выявление определяющих эти потоки факторов.

Для достижения поставленной цели в течение года в полевых условиях с применением камерных методов были выполнены измерения потоков диоксида углерода, метана и закиси азота. В качестве объекта исследования выбрано торфяное месторождение низинного типа Выгонощанское (к. н. 144).

Исследуемый участок (условное наименование мониторинговой площадки – V5) расположен в юго-восточной части Республиканского ландшафтного заказника «Выгонощанское» между озером Выгонощанское и деревней Выгонощи (координаты NE 52°38.419', 25°54.531'; 3,2 км на юг до деревни Выгонощи, 2,2 км на север до озера Выгонощанское, 0,9 км на восток до канала Огинского и примерно километр до выработанного участка торфяного месторождения) (рис. 1, а).

Методы исследований. Определение потоков парниковых газов в полевых условиях производилось в трехкратной последовательности в период с 5 апреля 2012 г. по 23 апреля 2013 г. Баланс диоксида углерода определяли с применением прозрачных и затененных камер (камерно-динамический метод) [1, 2], определяемые концентрации CO₂ по замкнутой системе поступали на инфракрасный газоанализатор LI-COR LI-820, фиксировались на устройстве ввода и хранения данных (CR Datalogger), после чего возвращались обратно в камеру; таким образом фиксировали динамику изменения концентрации CO₂ внутри пространства камеры.

Образцы CH₄ и N₂O получали в трехкратной последовательности с применением камерно-статического метода [3, 4], после чего следовал анализ полученных образцов на газовом хроматографе «Хроматек Кристалл 5000.2» с электронно-захватным и пламенно-ионизационным детекторами и азотом в качестве газа-носителя. Пробы газов отбирали через каждые 10 мин, в целом на одно измерение потока парниковых газов брали 4–5 колб. Таким образом получали поток газов за определенный промежуток времени.

На каждом участке были выполнены геоботанические описания растительности в соответствии со шкалами покрытия по Peet et al. [5]. Эта методика международно признанная, на основании ее создаются базы данных покрытия территории растительными сообществами [2, 6]. Глубину торфа месторождения определяли торфоотборочным буром ТБГ-66, описание торфа по глубине проводили по шкале von Post и Grosse-Brauckmann. Для элементарного анализа торфа использовали анализатор CHNOS марки Vario ELIII. Значения кислотности измеряли рН-метром HannaCombo HI 98130 в 1%-ном растворе KCl, калибровку рН-метра осуществляли буферными растворами 7,01 и 4,01. Зольность торфа определяли по СТБ 2042-2010 при озолении навесок с торфом в муфельной печи и прокаливании зольного остатка при температуре 800 °С.

Рядом с каждой площадкой установлены колодцы для определения УГВ с автоматическими датчиками Mini-Driver [7], которые непрерывно каждый час фиксировали значения УГВ и их температуру. В общей сложности за период измерений зафиксировано 10 735 значений. Помимо этого, рядом с мониторинговой площадкой располагался измерительный колодец, и УГВ измеряли вручную ультразвуковым лотом.

Температуры воды и воздуха измерялись с применением электронных термометров Volcraft Der1R (Германия). Также, для более точного определения газообмена от климатических показателей и моделирования годового баланса диоксида углерода, на территории деревни Выгонощи установлена метеорологическая станция, которая непрерывно фиксировала данные температуры окружающей среды, температуры почвы на глубине 2 и 5 см, значения атмосферного давления, фотосинтетически активной солнечной радиации (PAR) и уровня осадков, каждые 30 мин данные записывались на устройстве ввода и хранения данных метеостанции.

Для того чтобы обеспечить герметичность на границе почва/атмосфера, в почву на 18 см заглублены три рамки из ПВХ размером 70 см x 70 см. Расстояние между рамками – около 0,5 м. Таким образом УГВ, температура почвы и окружающей среды на исследуемых площадках были схожими (рис. 1, б).



а (a)



б (b)



в (c)

**Рис. 1. Мониторинговая площадка V5 (крапива):
а – расположение относительно других участков;
б – внешний вид; в – рамки в направлении «слева направо»**

**Fig. 1. The monitoring platform V5:
a – location relative to other sites; b – appearance;
c – the frame in the direction "from left to right"**

Для отбора проб метана и закиси азота использовали стеклянные колбы объемом 60 мл, которые предварительно провакуумировали (давление внутри вакуумированной колбы составляло около 4 mBar). За счет отрицательного давления внутри колбы газ из воздушного пространства в камере поступал в колбу, которую затем закрывали вентилем. Для последовательного анализа 64 образцов использовали автосемплер со встроенным компьютером, оснащенный программной системой Probe 65.

Для определения потоков метана и закиси азота использовали пакет 'flux 0.3-0' [8] для открытого программного обеспечения R. Для расчета уровня газообмена в зависимости от линейных изменений концентраций парниковых газов в воздушном пространстве камеры в течение времени экспозиции, в пакете flux используется уравнение (1) [2–4, 8]:

$$F = \frac{M}{R} \frac{pV}{TA} \frac{dc}{dt}, \quad (1)$$

где F – уровень потока исследуемого газа, $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$; M – молярная масса газа, $\text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$; R – универсальная газовая постоянная – $8,3143 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$; p – давление, Па; V – объем воздушного пространства, откуда отбирается проба газа, м^3 ; T – температура, К; A – площадь рамки, м^2 ; $dc \cdot dt^{-1}$ – изменение концентрации газа во времени, $\text{ppm} \cdot \text{ч}^{-1}$.

Для моделирования годового баланса диоксида углерода использовали следующие общепринятые понятия: валовая первичная продуктивность (GPP), представляющая собой весь углерод, который аккумулировали растения в процессе фотосинтеза; сумма автотрофного и гетеротрофного дыхания – экосистемное дыхание (R_{eco}); нетто-экосистемный обмен (NEE) – суммарное значение валовой первичной продуктивности и дыхания экосистемы.

Для моделирования дыхания нарушенных болотных экосистем использовали уравнение Ллойда – Тейлора [2–4, 9]:

$$R_{eco} = R_{ref} e^{E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T - T_0} \right)}, \quad (2)$$

где R_{eco} – уровень дыхания экосистемы, $\text{CO}_2\text{-C}$ $\text{мг/м}^2 \cdot \text{ч}$; R_{ref} – дыхание с учетом заданной температуры, $\text{CO}_2\text{-C}$ $\text{мг/м}^2 \cdot \text{ч}$; E_0 – энергия активации, К; T_{ref} – заданная температура, 283,15 К; T_0 – постоянная температура для начала биологических процессов, 227,13 К; T – температура почвы или воздуха во время измерения, К.

Значения R_{ref} и E_0 рассчитывали путем постановки уравнения (2) в регрессию измеренных в полевых условиях экосистемного дыхания и температуры. R_{eco} моделировали с шагом в 0,5 ч от предыдущего дня измерения к последующему на основании уравнения (1), расчетных параметров и температурных данных высокой частоты измерений, которые были получены с расположенной вблизи места измерения диоксида углерода метеостанции.

Следующим шагом являлось вычисление значения GPP путем вычитания смоделированного R_{eco} из значения NEE . Затем рассматривали регрессию GPP и PAR , используя уравнение равнобочной гиперболы Михаэлиса – Ментен [10]:

$$GPP = \frac{\alpha \cdot PAR \cdot GP_{\max}}{\alpha \cdot PAR + GP_{\max}}, \quad (3)$$

где GPP – валовая первичная продуктивность, $\text{CO}_2\text{-C}$, $\text{мг/м}^2 \cdot \text{ч}$; α – начальный уклон кривой эффективности использования освещенности, $\text{мг CO}_2\text{-C м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} / \text{моль м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; PAR – плотность потока фотонов фотосинтетически активной радиации, $\text{моль/м}^2 \cdot \text{с}$; $GP_{\max}$ – максимальная скорость фиксации углерода при бесконечном PAR , $\text{CO}_2\text{-C}$, $\text{мг/м}^2 \cdot \text{ч}$.

Моделирование GPP согласно уравнению (3) выполняли на основании расчетных параметров и измеренных на метеорологической станции значениях PAR . Годовой NEE рассчитывали как разницу между моделируемым GPP и моделируемым R_{eco} .

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 представлены результаты определения степени разложения торфяной залежи по профилю по шкале вон Поста.

Торфяная залежь глубиной 2 м представлена в основном тростниковым торфом. Проанализировав табл. 1, можно сказать, что верхние 30 см торфа представлены сильноразложившимся торфом, средняя зольность – 45,40 % ($n = 9$), однако начиная с глубины 60 см и ниже торф представлен средне-разложившимся торфом (Н6 и Н5 по шкале вон Поста) с включением остатков тростника и гитии,

ниже 170 см – слаборазложившимся торфом (НЗ, К1–2 по шкале вон Поста) с остатками тростника, древесины и гипновых мхов.

Из растительных сообществ на мониторинговой площадке преобладает крапива двудомная (*Urtica dioica*) (индекс покрытия по шкале Пита – 10 [5]), в незначительной степени присутствуют пырей ползучий (*Elytrigia repens*), дрема белая (*Silene latifolia* ssp. *alba*), череда олиственная (*Bidens frondosa*) (индекс покрытия по шкале Пита 1–2), на исследуемом участке очевидна сукцессия в сторону рудеральных синантропов. По каталогу GEST [6, 7] исследуемая территория относится к вегатипу *Urtica dioica-Silene latifolia-weed*, и согласно [11] ее исследовали для заполнения пробелов GEST. Среднее значение pH составило 6,00 ($n = 9$) – слабокислая среда, соотношение C : N составило 12,61 ($n = 3$).

Таблица 1. Степень разложения торфяной залежи мониторинговой площадки V5 по шкале вон Поста

Table 1. The degree of decomposition of the peat deposit of the monitoring site V5 on the von Post scale

Толщина торфяного слоя	0–30	–60	–100	–140	–170	–180	–200
Степень разложения	Н8	Н6	Н5	Н4	Н3	К1	К2
Краткое описание торфа	Сильноразложившийся торф, живые корни	Мелкозернистый торф: хитин, корни ⁺	Мелкозернистый торф: тростник ⁺⁺	Мелкозернистый торф: тростник ⁺⁺ , гипновые мхи ⁺	Гипновый торф: семена	Органическая гития: сероватый, тростник ⁺ , корни ⁺	Глеевая гития

Примечание: ⁺ – редко и ⁺⁺ – часто встречается.

Наземные экосистемы являются мощнейшим источником поглощения углерода из атмосферы. Постоянно приблизительно 120 Pg углерода в год аккумулируется растениями в процессе фотосинтеза [12]. Из этого валового первичного продукта (*GPP*) приблизительно 60 Pg углерода в год возвращается в атмосферу вследствие автотрофного дыхания и приблизительно 60 Pg углерода в год расходуется на рост и поддержание гомеостаза растительных тканей [12].

Другими словами, нетто-экосистемный обмен (*NEE*) связан с двумя противоположно направленными процессами: валовым первичным продуктом (*GPP*) и дыханием экосистемы (*R_{eco}*). После отмирания растительного материала органический углерод становится продуктом гетеротрофного дыхания благодаря микробному окислению органического углерода. Процесс разложения органического вещества протекает в аэробных условиях и сопровождается выделением CO₂. Помимо этого в аэробных условиях аммоний подвергается процессу нитрификации – преобразованию аммиака в нитритный ион, а затем в нитратный.

Первый этап осуществляется бактериями *Nitrosomonas* и другими и заключается в окислении аммиака до HNO₂ через гидроксилламин NH₂OH и гипонитриты (которые представляют собой соли азотноватистой кислоты HO — N = N — OH) как промежуточные продукты. Второй этап осуществляется бактериями *Nitrobacter* и другими, при этом трехвалентный азот окисляется до пятивалентного [13]. В анаэробных условиях развиваются процессы денитрификации, в результате которых нитраты и нитриты с помощью бактерий-денитрификаторов (*Pseudomonas*, *Micrococcus* и др.) восстанавливаются до N₂O или до газообразного молекулярного азота (восстановление закиси азота до молекулярного азота катализируется ферментом редуктазой закиси азота – рустицианином [14]). В итоге молекулярный азот после разнообразных биохимических преобразований вновь поступает в атмосферу. Помимо этого часть органического углерода, покрытого водой и находящегося в анаэробных условиях, подвергается метаногенезу [14]. Субстратом для метаногенных бактерий являются, в основном, водород и углекислый газ, ацетат [13].

Существует два основных пути образования метана: восстановление углекислого газа или ферментация ацетата. При этом, если ферментация – основной канал образования метана при преобразовании глюкозы, то на одну молекулу метана образуется две молекулы CO₂. Если же метан образуется в ходе восстановления CO₂, то на одну молекулу метана образуется одна молекула углекислого газа.

На рис. 2 представлены результаты полевых измерений диоксида углерода (рис. 2, а), метана и закиси азота (рис. 2, б) за период измерений, а также изменений наиболее коррелирующих метеопоказателей (рис. 2, в).

Уровень залегания грунтовых вод на исследуемом участке всегда находился ниже поверхности (от –40 см в весенний, наиболее паводковый период, до –134 см в засушливый период).

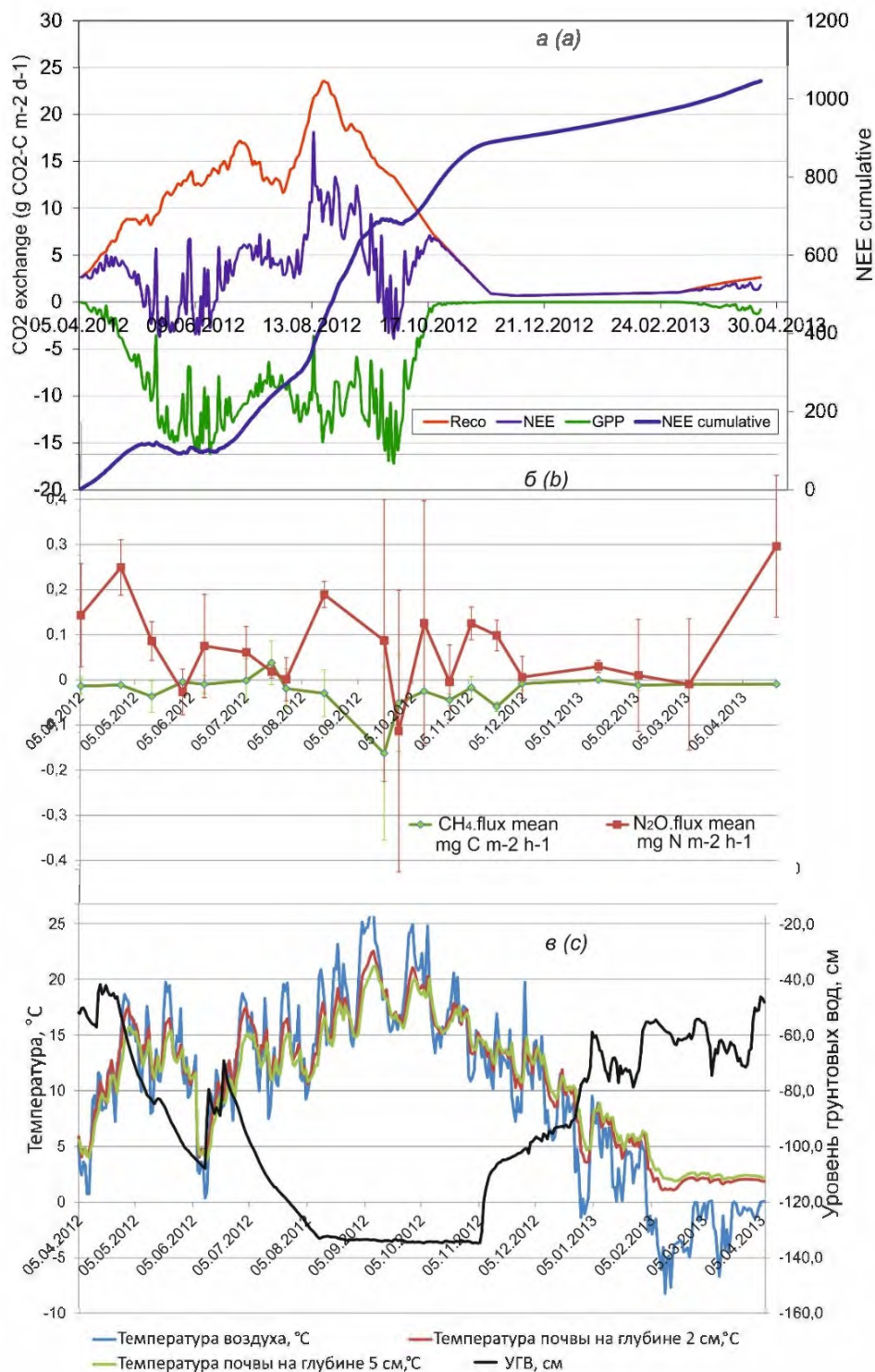


Рис. 2. Динамика потоков диоксида углерода, метана и закиси азота в течение года, метеорологических данных, уровня грунтовых вод:
а – годовая модель потоков CO₂; б – эмиссии метана и закиси азота за период измерений;
в – динамика температуры окружающей среды, температуры почвы на глубинах 2 и 5 см, а также уровня грунтовых вод

Fig. 2. Dynamics of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes during the year, meteorological data, groundwater level data:
a – annual model of CO₂ fluxes; b – methane and nitrous oxide emissions during the measurement period;
c – dynamics of ambient temperature, soil temperature at depths of 2 and 5 cm, and ground water level

На рис. 2, в схематически показана зависимость УГВ от температуры почвы и окружающей среды, прослеживается очевидная зависимость: чем выше температура окружающей среды и почвы, тем ниже уровень стояния грунтовых вод. Выделяется период с середины августа до середины ноября, когда УГВ относительно продолжительный период времени находился примерно на одном уровне (около 130 см ниже поверхности почвы). На этот факт оказала влияние, прежде всего, близость магистрального канала (около 230 м), а также в некоторой степени свойства торфа по профилю: на глубине ниже 140 см торф представлен гипновыми мхами с невысокой степенью разложения (см. табл. 1), а согласно [15] гипновый торф характеризуется невысокой плотностью сложения и высокой влагоемкостью, тем самым задерживая влагу на определенном уровне. Также можно предположить, что был достигнут предел измерения автоматического датчика УГВ, однако ручные измерения УГВ, проводимые непосредственно в период измерительных кампаний, показали разброс значений УГВ в указанный период от 127 до 139 см ниже поверхности почвы.

Анализ рис. 2, а показал, что наиболее высокий нетто-экосистемный обмен был отмечен на мониторинговой площадке V5 в сентябре и составил $18,10 \text{ г CO}_2\text{-C} / \text{м}^2\cdot\text{день}$; суммарный же кумулятивный нетто-экосистемный обмен на мониторинговой площадке с преобладанием крапивы двудомной составил $1042,14 \text{ г CO}_2\text{-C} / \text{м}^2\cdot\text{год}$, что является достаточно высоким показателем. Дыхание экосистемы было максимальным в конце августа и составило $22,98 \text{ г CO}_2\text{-C} / \text{м}^2\cdot\text{день}$. График на рис. 2, а отражает четкую зависимость между температурами почвы или окружающей среды, экосистемным дыханием и валовой первичной продуктивностью. Также в период роста растительности (с апреля по август) возрастали экосистемное дыхание и аккумуляция углерода растениями, а в период увядания растений сокращалось экосистемное дыхание и снижалось потребление углерода растительным покровом для метаболизма. В зимнее время отмечалось минимальное дыхание, чему способствовали низкие температуры и плохая проницаемость промерзшей почвы для газообразных веществ.

Потоки метана за год измерений были близкими к нулю с несущественными отклонениями от $-0,163 \text{ мг CH}_4\text{-C} \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ в конце сентября до $0,018 \text{ мг CH}_4\text{-C} \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ в середине июля (см. рис. 2, б). В целом же исследуемый участок являлся источником незначительного стока метана, и суммарные годовые потоки метана составили $-0,16 \text{ г CH}_4\text{-C} \text{ м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$, что равноценно $-0,116 \text{ кг CH}_4$ с гектара в год, или $-0,003 \text{ т CO}_2\text{-экв}$. Потоки закиси азота в исследуемый период аналогично были близкими к нулю, чаще наблюдались несущественные положительные выбросы, однако наблюдались некоторые отклонения от $-0,113 \text{ мг N}_2\text{O-N} \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ в конце сентября до $0,249 \text{ мг N}_2\text{O-N} \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ в конце апреля. Суммарно же выбросы закиси азота с исследуемой территории составили $0,55 \text{ г N}_2\text{O-N} \text{ м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$, что равноценно $0,891 \text{ кг N}_2\text{O}$ с гектара в год, или $0,276 \text{ т CO}_2\text{-экв}$.

В более ранних публикациях уже приводились данные измерений диоксида углерода [1], метана [3] и закиси азота [4] на торфяном месторождении Выгонощанское, указанные исследования проводили в аналогичный период и также в рамках белорусско-немецко-британского проекта «Восстановление торфяников Беларуси и применение концепции их устойчивого развития – снижение воздействия на климат с эффектом для экономики и биоразнообразия», однако исследуемые территории существенно различались по геоботаническому составу и физико-химическим характеристикам залежи. В то же время из-за идентичности климатических условий целесообразно выполнить сравнительный анализ потоков исследуемых газов, что и было сделано.

Так, на описываемых ранее мониторинговых площадках доминирующими видами были канареечник тростниковидный (*Phalaris Arudinacea*) (площадки V1 и V2), ситник развесистый (*Juncus Effusus*) (площадка V3) и луговое разнотравье с преобладанием тимopheевки *Phleum praence* (площадка V4). Реакция среды торфа на всех мониторинговых площадках слабокислая (pH от 4,90 до 5,45), средняя зольность от 3,06 % на площадках V1 и V2 до 4,00 % на площадках V3 и V4, что гораздо ниже зольности на описываемой мониторинговой площадке с крапивой двудомной – 45,40 %. Соотношение C : N на всех пяти мониторинговых площадках находилось в пределах 12. Однако исследуемые территории существенно различались по глубине торфяной залежи и УГВ. Так, если на изучаемой мониторинговой площадке V5 с преобладанием крапивы двудомной глубина торфяной залежи составила 200 см и УГВ варьировал от -43 до -137 см ниже поверхности почвы, то на площадках V1 и V2 глубина торфяной залежи составила 150 см, УГВ находился в диапазоне от -40 см ниже поверхности до $+3$ см выше поверхности почвы, а на площадках V3 и V4 глубина торфяной залежи составила всего лишь 100 см, а УГВ находился в пределах от -65 см в летний период до $+10$ см в период весеннего снеготаяния.

В табл. 2 представлена сравнительная характеристика потоков CO_2 , метана и закиси азота на описываемой мониторинговой площадке V5 с доминирующим видом крапива (*Urtica dioica*) и описываемыми ранее мониторинговыми площадками V1–V4. Для получения результирующих процессов учитывали газы, как образующиеся в верхнем слое почвы, так и диффундирующие из нижележащих слоев [11].

Таблица 2. Суммарные потоки диоксида углерода, метана и закиси азота с мониторинговых площадок за год исследований

Table 2. Total fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide from monitoring sites for the year of research

Пло- щадка	Эмиссии диоксида углерода				Эмиссии метана			Эмиссии закиси азота			С [г м ⁻² год ⁻¹]	Баланс ПГ [т га ⁻¹ год ⁻¹]
	CO ₂ -C, г/м ² ·год			CO ₂ , т/га·год [CO ₂ -экв.]	rCH ₄ [г С м ⁻² год ⁻¹]	CH ₄ [кг CH ₄ га ⁻¹ год ⁻¹]	CH ₄ , т/га·год [CO ₂ -экв.]	rN ₂ O [г N м ⁻² год ⁻¹]	N ₂ O [кг N ₂ O га ⁻¹ год ⁻¹]	N ₂ O т/га·год [CO ₂ -экв.]		
	NEE	R _{eco}	GPP									
V1	358,33 ± 36,02	1716,01	-1357,68	13,14	7,15 ± 3,55	95,38	2,670	-0,03 ± 1,61	-1,17	-0,31	365,48	15,50
V2	220,20± 221,71	1837,30	-1617,09	8,07	10,65 ± 5,32	142,03	3,977	0,14 ± 1,65	5,18	1,37	230,85	13,42
V3	405,21 ± 66,77	2226,53	-1821,32	14,86	1,30 ± 0,62	17,40	0,487	0,53 ± 1,48	19,44	5,15	406,51	20,50
V4	1179,66 ± 297,54	2476,48	-1296,82	43,25	-0,02 ± 0,23	-0,33	-0,009	0,54 ± 0,67	19,79	5,24	1179,64	48,48
V5	951,89 ± 149,25	2774,36	-1822,47	34,90	-0,16 ± 0,26	-2,13	-0,053	0,55 ± 0,83	20,06	5,32	951,22	40,17

Примечания.

1. ± – стандартное отклонение.
2. Величина относительного потенциала глобального потепления, используемая для перевода CH₄ и N₂O в CO₂-экв, использована по данным Пятого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата, 2013 (табл. 8.A.1, гл. 8) [16].
3. Серым фоном выделены результирующие потоки диоксида углерода, метана, закиси азота с мониторинговой площадки с преобладанием крапивы двудомной.

Анализ табл. 2 показал, что наибольшие эмиссии диоксида углерода наблюдались на мониторинговой площадке с преобладанием лугового разнотравья и на мониторинговой площадке с крапивой двудомной. При этом максимальное поглощение диоксида углерода (GPP) соответствовало мониторинговым площадкам с высокорослой растительной биомассой (крапива и ситник) с высоким процентом покрытия по шкале Peet [5]. Если же сравнивать соотношение GPP/R_{eco} (в виде CO_2-C) по всем мониторинговым площадкам, то более низкими значения были на площадках V1–V3 (около $-0,8$), на площадках V4 и V5 данное отношение составило $-0,52$ и $-0,65$ соответственно. Таким образом, в общем балансе диоксида углерода гетеротрофное дыхание оказало большую роль на мониторинговых площадках V4 и V5, нежели на мониторинговых площадках V1–V3. Другим признаком того, что дыхание экосистемы на мониторинговой площадке V4 в значительной степени было гетеротрофным, является совпадение больших потоков R_{eco} с невысоким объемом растительной биомассы. Соответственно, на V4 и V5 потери чистого углерода также были самыми высокими, в незначительной степени нивелируемыми лишь жизнедеятельностью метанотрофных микроорганизмов, и составили $1179,64$ [г CO_2-C м $^{-2}$ ·год $^{-1}$] для площадки V4 и $951,22$ [г CO_2-C м $^{-2}$ ·год $^{-1}$] для V5 соответственно.

Наибольшие эмиссии метана наблюдались на мониторинговых площадках V1 и V2, на площадке V3 они были незначительными, на площадках V4 и V5 наблюдалось незначительное поглощение метана. Эмиссии N_2O на мониторинговых площадках V3, V4 и V5 находились на достаточно высоком уровне и имели значения около 5 т/га·год N_2O [CO_2 -экв.], наименьшие эмиссии закиси азота наблюдались на площадке V2, мониторинговая площадка V1 была стоком закиси азота.

Согласно [11], для глубоко осушенных (участки 2+ по системе GESTs), используемых в сельском хозяйстве торфяных месторождений характерны высокие эмиссии диоксида углерода – более 20 т CO_2 с га в год. При измерениях закиси азота [17] на осушенных торфяных месторождениях умеренной климатической зоны были получены следующие результаты: эмиссии N_2O с осушенных торфяников, на которых произрастают многолетние травы, при недостатке питательных веществ в среднем составили $4,3$ кг N_2O-N га $^{-1}$ ·год $^{-1}$ [7, 17], при глубоком осушении и избытке питательных веществ эмиссии закиси азота в среднем составили $8,2$ кг N_2O-N га $^{-1}$ ·год $^{-1}$ [17], при неглубоком осушении эмиссии N_2O в среднем составили $1,6$ кг N_2O-N га $^{-1}$ ·год $^{-1}$ [17]. В то же время эмиссии закиси азота с повторно заболоченных торфяных месторождений близки к нулю [18]. Значения для бореальных и умеренных климатических зон схожи ($0,06$ – $0,07$ кг N га $^{-1}$ ·год $^{-1}$) [19]. По данным литературного обзора [19], самые низкие эмиссии метана наблюдались с бедных питательными веществами бореальных и тропических районов (41 кг C га $^{-1}$ ·год $^{-1}$), а самые высокие выбросы CH_4-C были отмечены с богатых питательными веществами участков умеренного пояса (216 кг C га $^{-1}$ ·год $^{-1}$). Эмиссии метана на осушенных торфяниках, используемых как пахотные земли, составили $1,98$ кг C га $^{-1}$ ·год $^{-1}$ для бореальной и умеренной климатических зон; с осушенных торфяников, на которых произрастают многолетние травы, – $2,03$ кг C га $^{-1}$ ·год $^{-1}$ для бореальной зоны; на территориях под многолетними травами при недостатке питательных веществ эмиссии метана – $2,04$ кг C га $^{-1}$ ·год $^{-1}$ для умеренной климатической зоны. В условиях избытка питательных веществ на участках многолетних трав эмиссии CH_4 составили $2,50$ кг C га $^{-1}$ ·год $^{-1}$ – при глубоком осушении и $2,16$ кг C га $^{-1}$ ·год $^{-1}$ – при неглубоком залегании грунтовых вод. На участках торфодобычи эмиссии метана бореальной и климатической зоны составили $1,12$ кг C га $^{-1}$ ·год $^{-1}$.

Полученные в рамках данной работы результаты полевых измерений диоксида углерода, закиси азота и метана достаточно точно коррелируют с мировым опытом в этой области исследований, разница в этих результатах связана с различиями в общетехнических и физико-химических характеристиках торфа, в сроках осушения и окультуривания и т. п.

Согласно многим исследованиям (например: [1, 2, 6, 7, 11–14, 16–19]) количество эмиссий диоксида углерода находится в тесной зависимости от уровня залегания грунтовых вод. Понижение УГВ способствует проникновению кислорода в торфяную залежь и вызывает ускоренную минерализацию органического вещества торфа [11]. В описываемых в рамках данной работы исследованиях также наблюдается четкая зависимость эмиссий диоксида углерода от УГВ. Так, на площадках V1 и V2, среднегодовой УГВ которых находился в пределах $-9,45$ см, суммарные эмиссии CO_2 составили $13,1$ и $8,1$ т CO_2 с га в год соответственно. Наиболее высокие эмиссии диоксида углерода наблюдались на мониторинговой площадке под многолетними травами (мониторинговая площадка V4), среднегодовой УГВ на которой составил $-33,2$ м.

Одной из основных причин увеличения эмиссии CO_2 из нарушенных болотных экосистем считается увеличение интенсивности разложения органического вещества торфа, связанное с повышением ее аэрации [1, 13, 14, 20]. Это утверждение подтверждает полученные результаты полевых измерений потоков диоксида углерода (см. табл. 1 и 2, а также [1]): при средней степени

разложения торфа эмиссии диоксида углерода низкие, с увеличением степени разложения эмиссии CO_2 возрастают.

Сезонная динамика интенсивности экосистемного дыхания зависит от температуры и влажности почвы [13, 14, 21], уровня залегания грунтовых вод, роста надземной и корневой биомассы растений [14]. Как отмечает Макаров [21], общий сезонный максимум выделения CO_2 из почвы для многих типов растительных ассоциаций, как правило, приходится на период максимального роста растений либо совпадает с моментом интенсивного разложения вновь поступившего растительного опада. Другими авторами [22] выявлены зависимости валовой первичной продуктивности (GPP) от температуры, количества осадков, потенциальной эвапотранспирации и продолжительности периода вегетации.

Наибольшие суммарные эмиссии метана наблюдались с торфяника с повышенным УГВ на участках с преобладанием канареечника тростниковидного (*Phalaris arundinacea*), на котором не осуществлялось кошение биомассы, и составили $142,03 \text{ кг CH}_4\text{-C га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$; при кошении биомассы эмиссии метана уменьшились примерно на 30 %, в связи с этим кошение растительной биомассы можно рекомендовать как способ снижения эмиссий метана, а также диоксида углерода, с торфяников, поскольку количественно уменьшается присутствие растительной биомассы и, как следствие, снижаются эмиссии метана вследствие распада лабильных веществ биоматериала [23]. Также разница в эмиссиях метана на площадках V1 и V2 связана с различием растительных сообществ, в некоторой степени с микротопографией поверхности почвы (площадка V1 отличается большим количеством неровностей почвы). На территориях с глубоким залеганием грунтовых вод определяющим фактором на эмиссии метана служит наличие шунтирующих видов. На площадках V1 и V2 доминирующим видом является канареечник тростниковидный (*Phalaris arundinacea*), а на площадке V3 доминирует ситник развесистый (*Juncus effusus*). Эти растения относятся к шунтирующим макрофитам, т. е. к видам с так называемой аэренхимной (воздухоносной) тканью. Макрофиты поставляют важные субстраты для метаногенов в виде корневых выделений и растительных остатков, тем самым увеличивая их продуктивность. Они действуют как газопровод, посредством чего происходит перенос кислорода в ризосферу, а восстановленный метан может обходить бескислородный слой торфа без окисления до CO_2 . Следовательно, наличие таких видов растений повышает скорость эмиссии CH_4 [3, 6, 7, 24]. Растения с глубокими корнями могут рассматриваться как «удлинители» из атмосферы в бескислородный торф, где образуется CH_4 . Следовательно, поступление CH_4 в аэренхиму корней шунтирующих видов облегчается благодаря диффузионному градиенту между торфом и атмосферой в противоположном кислороду направлении [7]. Количество выделенного метана с естественных болот может быть в 2 раза выше, чем у похожих типов растительности без растений с аэренхимой. В нашем случае, даже если сравнивать площадку V3 с шунтирующим видом *Juncus effusus* и расположенную рядом площадку V4 без шунтирующих видов, количественно суммарные эмиссии метана за год гораздо выше на площадке с шунтирующим видом (см. табл. 2). Так, на площадке с доминирующим видом *Juncus effusus* суммарные эмиссии метана составили $17,40 \text{ кг CH}_4\text{-C га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$, а на площадке без шунтирующих видов наблюдалось суммарное поглощение метана ($-0,33 \text{ кг CH}_4\text{-C га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$).

Снижение УГВ на мониторинговой площадке V5 в середине лета, продолжающееся до конца ноября, способствовало росту интенсивности минерализации торфяных почв и увеличению метанооксиляющей активности в верхних слоях торфяной залежи [14]. Максимальная интенсивность поглощения метана отмечена осенью. В период низкого УГВ осушенный слой торфяной почвы работал как метанопоглощающий фильтр, который окислял метан, образующийся в анаэробной зоне, что приводило к снижению общего потока метана из почв в атмосферу. В отличие от метана, поток закиси азота в этих условиях возрастал, что обусловлено облегченной диффузией N_2O в окислительных условиях, в силу преимущественно анаэробного характера процесса микробного восстановления N_2O в почвах. Таким образом, понижение УГВ сопровождалось ростом потока N_2O из почв в атмосферу при одновременном снижении эмиссии CH_4 .

При колебании УГВ залежи резко меняется гидротермический и воздушный режим среды обитания микроорганизмов и происходит существенная перестройка количественного состава нитрификаторов [25]. Также по мере снижения концентрации кислорода в почвенном воздухе денитрифицирующая активность возрастает, приближаясь к максимальному уровню при содержании кислорода около 0,5 % [25]. На незаболоченных территориях процесс денитрификации объясняется наличием анаэробных микрозон или возникновением локального анаэробнозиса вследствие быстрого уменьшения кислорода при интенсивном разложении органического вещества [26]. Исходя из данных среднегодового залегания УГВ по всем мониторинговым площадкам, на всех исследуемых территориях нитрифицирующие микроорганизмы должны быть представлены бедно.

Однако, проанализировав рис. 2, б и графики годовых потоков метана и закиси азота в исследованиях [3, 4], заметно существенное понижение УГВ в летний период, а на площадке V5 – в летне-осенний период. Так, на мониторинговых площадках V3 и V4 в летний период грунтовые воды находились на уровне –60...–70 см, на площадках V1 и V2 наблюдались перепады УГВ от 0 до –50 см, на площадке V5 УГВ начал опускаться в июле с –80 см, а в период с сентября по ноябрь УГВ составил –137 см. Таким образом, из всех изучаемых территорий, мониторинговая площадка V5, согласно данным [25], должна быть наиболее богата нитрифицирующими бактериями. Площадки V3 и V4 по наличию нитрификаторов беднее, на площадках V1 и V2 содержание нитрифицирующих микроорганизмов лимитируется резкими перепадами УГВ на фоне общей гидрологической переувлажненности. Однако в летний период существенных эмиссий N_2O с торфяных месторождений с пониженным уровнем залегания грунтовых вод не наблюдалось. Более высокие эмиссии отмечены на площадках V1 и V2, на которых наблюдались перепады УГВ. При этом изучение соотношения окиси и закиси азота в продуктах денитрификации показало, что при большей влажности увеличивается эмиссия N_2O , а при меньшей – NO [27]. Переменное высушивание/переувлажнение почвы, как и наблюдалось на площадках V1 и V2, стимулирует эмиссию как NO , так и N_2O [27]. Помимо этого, авторами [28] отмечены наиболее высокие эмиссии N_2O на осушенных участках торфяного месторождения в ноябре и декабре – в период наиболее существенных перепадов УГВ (от –10 до –40 см).

На производство и выбросы метана большое влияние оказывают физические, химические и биологические факторы и свойства почв, такие как содержание органических питательных веществ, окислительно-восстановительный потенциал, кислотность и соленость. Такие факторы, как региональная гидрология, температура, сезонность, доступность субстрата и засоленность, влияют не только на производство этого следового газа, но и на его потребление метанотрофами или его выброс из почвы в атмосферу [29], таким образом эмиссии метана снижаются вплоть до его полного поглощения. Гидрология играет ключевую роль в этих явлениях: заболоченные и бескислородные почвы способствуют производству метана. И наоборот, торфяные почвы, которые в некоторой степени аэрированы, могут служить стоком для аэробных метанотрофов, потребляющих метан.

В исследовании [3] отмечалась прямая зависимость эмиссий метана от температуры окружающей среды, а соответственно, и температуры почвы. Температура почвы влияет на метаболическую активность микроорганизмов, продуцирующих субстраты для ингибиторов метаногенеза, а также на сами метаногены. На мониторинговой площадке с преобладанием крапивы двудомной такой зависимости не было, можно отметить лишь некоторое увеличение поглощения метана в осенний период, когда повышается влажность торфа, его температура достаточно высокая, а растения уже находятся в стадии увядания; это связано с тем, что большинство метаногенных микроорганизмов являются мезофилами [28] с температурным оптимумом 30–40 °C [29].

Торфяные месторождения могут содержать значительное количество органического азота в неактивной форме. Осушение позволяет бактериям преобразовывать азот в нитраты, которые затем вымываются и попадают на поверхность, где они восстанавливаются до N_2O . На осушенных торфяниках потенциальное количество выделяемого N_2O зависит от содержания азота в торфе [30]. При соотношениях C : N, превышающих 25, выделяемые количества N_2O могут считаться незначительными [30]. При соотношении C : N от 10 до 18 эмиссии N_2O увеличиваются и могут достигать более 10 кг N га⁻¹·год⁻¹. Реакция N_2O на повышенное отношение C : N представляет собой кривую Гаусса с порогом 18–19 [30]. На всех исследуемых мониторинговых площадках торфяного месторождения Выгонощанское соотношение C : N находилось в пределах 11,5–12,5, и только значение эмиссий N_2O на площадках V3 и V4 подтверждают результаты исследования [30]. Следовательно, при соотношениях C : N ниже 15–20 другие параметры, такие как климат, кислотность и УГВ, приобретают все большее значение как регулирующие факторы, влияющие на выбросы N_2O [30].

Согласно [25], уровень ферментативной активности торфяных почв с преобладанием осоки в ботаническом составе по ряду показателей выше, чем в тростниковом торфе. Так, в осоковом торфе более высоко процентное содержание общей биомассы грибов и бактерий, а также представителей различных трофических групп микрофлоры в расчете на органическое вещество, что обеспечивает их более высокую доступность микроорганизмам [25], и поэтому эмиссии закиси азота с площадок с преобладанием осокового торфа должны быть выше, чем площадок с преобладанием тростникового торфа. О существенных различиях активности микробиологических процессов торфяников разного ботанического состава можно судить по данным об интенсивности разрушения целлюлозы, дыхании почвы, ее способности к нитрификации и т. п. По ботаническому составу торф на мониторинговых площадках V1 и V2 осоковый, а на площадках V3, V4 и V5 – тростниковый, поэтому с этой позиции на мониторинговых площадках V1 и V2 эмиссии закиси

азота могли быть гораздо выше, однако в более значительной степени на обратный результат повлияла степень переувлажненности торфяной залежи.

Скорость окисления метана в почве частично контролируется небиологическими факторами, в первую очередь окислительно-восстановительными условиями среды и пористостью почвы. Окисление метана не может происходить в отсутствие кислорода [31], следовательно, в заболоченных почвах этот процесс важен только на поверхностной кислородно-бескислородной границе или в ризосфере корней растений. Однако в диссертационном исследовании [32] отмечено, что метаногены способны выдерживать присутствие кислорода в течение нескольких часов и даже дней без снижения численности и жизнеспособности. Автор [32] отмечает, что выживание образующих метан бактерий в аэрируемых почвах может быть связано: 1) с наличием не выделенных еще метаногенов, мало чувствительных к присутствию кислорода; 2) с наличием анаэробных микростран (как правило, внутри почвенных агрегатов), образующихся при вытеснении почвенного воздуха водой и (или) в областях скопления больших количеств органических веществ, активное разложение которых аэробными микроорганизмами приводит к истощению кислорода.

Окультуривание торфяных месторождений низинного типа вызывает существенное увеличение количества нитрифицирующих микроорганизмов, которое зависит как от срока окультуренности, так и от мощности торфяной залежи. Окультуривание маломощных торфяных месторождений, по сравнению со средне- и высокомоощными, приводит к значительному увеличению численности и активности микроорганизмов [25]. В маломощных торфяных залежах значительно выше общая численность микроорганизмов, использующих минеральный азот, актиномицетов, нитрифицирующих бактерий, т. е. той части микрофлоры, которая активно осуществляет биологическую минерализацию азотсодержащих органических соединений торфа [25]. С этой точки зрения из всех мониторинговых площадок самыми маломощными являются площадки V3 и V4, а самой мощной – площадка V5. Следовательно, наиболее активно процессы аммонификации и нитрификации должны протекать на площадках V3 и V4. На площадке V5 эти процессы скорее всего замедляются, в то же время происходят дополнительные потери азота вследствие его поступления в грунтовые воды.

По данным [25], нитрификация в сильно разложившемся торфе проходит несколько медленнее, чем в среднеразложившемся. Это связано с тем, что с ростом степени разложения возрастает выход фенолосодержащих гуминовых веществ и водорастворимых фульвокислот, которые тормозят деятельность микроорганизмов [28]. С учетом этого на мониторинговых площадках нитрификация должна увеличиваться в направлении $V5 > V3$ и $V4 > V1$ и $V2$, что подтверждает полученные нами данные по увеличению выделения N_2O в том же направлении.

В весенний период значительных колебаний потоков закиси азота не наблюдалось, на мониторинговой площадке V1 отмечено существенное поглощение N_2O в конце мая, на площадке V5 отмечаются в некоторой степени повышенные эмиссии закиси азота в первой половине мая. Существует мнение, что объяснением сезонных колебаний закиси азота является смешивание весной N_2O -бедного стратосферного воздуха и N_2O -насыщенного тропосферного воздуха [33]. Полученные в результате описываемого исследования данные подтверждают это явление, однако камерные методы позволяют измерять потоки газов прежде всего в приземном слое, в то время как гораздо более дорогие методики, к примеру, такие как башни Эдди коварьанс [34] или авиационные исследования в смешанном слое [35], могли бы зафиксировать переход закиси азота в стратосферу.

Помимо стратосферного переноса N_2O в мировой практике имеется много экспериментальных данных, подтверждающих поглощение микроорганизмами почвы, продуцирующими N_2O -редуктазу, атмосферной закиси азота [36, 37]. Исследования [37] показывают, что из профиля почвы глубже 10 и 20 см выделялось соответственно в 1,4–3,6 и 3,5–4,4 раза больше N_2O-N , чем с поверхности почвы. Следовательно, значительное количество закиси азота не доходит до границы раздела почвы и атмосферы, подвергаясь биотической или абиотической реутилизации на глубине [37]. При этом следует отметить, что при увеличении значения кислотности существенно снижается активность N_2O -редуктазы, а это, в свою очередь, сопровождается ростом доли закиси азота в продуктах денитрификации [14], что можно наблюдать после оценки годовых эмиссий закиси азота с торфяных месторождений.

Заключение. Проанализировав результаты табл. 2 и рис. 2, а также аналогичные исследования эмиссий диоксида углерода [1], метана [3] и закиси азота [4] с других мониторинговых площадок торфяного месторождения Выгонощанское, можно утверждать следующее.

Величина потоков диоксида углерода, метана и закиси азота с торфяных месторождений зависит от уровня залегания грунтовых вод, влажности торфяной залежи, температуры окружающей среды и торфа, наличия питательных веществ в залежи, степени разложения торфа, сезонности, видового состава и уровня развития вегетативных сообществ. Эмиссии метана выше на

участках с повышенным уровнем залегания грунтовых вод, также отмечено существенное влияние температурных факторов и наличие шунтирующих видов растений. Суммарные средние эмиссии N_2O с осушенных торфяных месторождений, находящихся под многолетними травами, выше, чем с выбывшего из эксплуатации и находящегося под естественным заболачиванием торфяного месторождения и заброшенным участком торфяного месторождения с рудеральными растительными ассоциациями. Отмечено увеличение эмиссий закиси азота в ноябре в условиях частых колебаний влажности торфяной почвы и умеренно высоких температурах почвы и окружающей среды (около 10 °C).

Результаты исследования с торфяных месторождений с различными физико-химическими и геоморфологическими характеристиками позволяют оценить вклад этих газов в общий круговорот парниковых газов от природных источников в условиях Беларуси. Полученные результаты не противоречат результатам мировых исследователей и пополняют научную базу в этой области исследований. Для большего понимания процессов баланса углерода и азота в атмосфере необходимо дальнейшее, более детальное и длительное измерение потоков диоксида углерода, метана и закиси азота, так же, как и других парниковых газов.

Список использованных источников

1. Эмиссии диоксида углерода с нарушенных и восстанавливаемых болотных экосистем / Т. Д. Ярмошук [и др.] // Природопользование. – 2014. – № 25. – С. 70–81.
2. Drösler, M. Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystems, southern Germany. PhD thesis / M. Drösler. – München : Technischen Universität München, 2005. – 182 p.
3. Определение эмиссий метана на торфяном месторождении низинного типа «Выгонощанское» с различным уровнем залегания грунтовых вод / Т. Д. Ярмошук [и др.] // Природопользование. – 2013. – № 24. – С. 43–50.
4. Эмиссии закиси азота на нарушенных торфяных месторождениях низинного типа / Т. Д. Ярмошук [и др.] // Мелиорация. – 2014. – № 2 (72). – С. 122–137.
5. A flexible, multipurpose method for recording vegetation composition and structure / R. K. Peet, T. R. Wentworth, P. S. White // Castanea. – 1998. – № 63. – P. 262–274.
6. Towards a field guide for the assessment of greenhouse gas emissions from Central European peatlands / J. Couwenberg [et al.] // Emission reductions from rewetting of peatlands. – Greifswald University, 2008. – 27 p.
7. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy / J. Couwenberg [et al.] // Hydrobiologia. – 2011. – № 674. – P. 67–89. doi:10.1007/s10750-011-0729-x
8. Jurasinski, G. Flux 0.3-0. Flux rate calculation from dynamic closed chamber measurements. R package version 0.3-0 / G. Jurasinski [et al.] // Package 'flux'. – 25 April 2014. – 60 p.
9. Lloyd, J. On the temperature dependence of soil respiration / J. Lloyd, J. A. Taylor // Funct. Ecol. – 1994. – Vol. 8. – P. 315–323.
10. Michaelis, L Die Kinetik der Invertinwirkung / L. Michaelis, M. L. Menten // Biochemische Zeitschrift. – 1913. – № 49. – P. 333–369.
11. Tanneberger, F. Carbon credits from peatland rewetting / F. Tanneberger, W. Wichtman // Schweizerbart Science Publishers. – Stuttgart, 2011. – 224 p.
12. Hendriks, D. M. D. Integrated observations of greenhouse gas budgets at the ecosystem level / D. M. D. Hendriks. – Amsterdam : Vrije Universiteit, 2009. – 203 p.
13. Орлов, Д. С. Химия почв : учебник / Д. С. Орлов, Л. К. Садовникова, Н. И. Суханова. – М. : Высшая школа, 2005. – 558 с.
14. Степанов, А. Л. Микробная трансформация парниковых газов в почвах / А. Л. Степанов. – М. : ГЕОС, 2011. – 192с.
15. Гидрофизические свойства высокозольных низинных торфяных почв / Е. В. Шеин [и др.] // Почвоведение. – 2018. – № 10. – С. 1259–1264.
16. IPCC, 2013. Climate change: the Physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / Eds. T. F. Stocker [et al.]. – New York : Cambridge University Press, 2013. – 1535 p.
17. IPCC 2014, 2013 – Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / T. Hiraishi [et al.] (eds). – Switzerland, 2014. – 354 p.
18. Flooding of an abandoned fen by beaver led to highly variable greenhouse gas emissions / M. Minke [et al.] // Mires and Peat. – 2020. – Vol. 26. – Article 23. – P. 1–24.
19. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils / D. Wilson [et al.] // Mires and Peat. – 2016. – Vol. 17. – Article 04. – P. 1–28.
20. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / В. Н. Кудеяров [и др.]; отв. ред. Г. А. Заварзин // Ин-т физ.-хим. и биол. проблем почвоведения РАН. – М. : Наука, 2007. – 315 с.
21. Макаров, Б. Н. Газовый режим почвы / Б. Н. Макаров. – М. : Агропромиздат, 1988. – 103 с.
22. Углекислый газ в атмосфере / К.-Х. Валлен [и др.]; под ред. В. Баха [и др.]. – М. : Мир, 1987. – 534 с.

23. Кудеяров, В. Н. Азотный цикл и продуцирование закиси азота / В. Н. Кудеяров // Почвоведение. – 1999. – № 8. – С. 988–998.
24. Зименко, Т. Г. Деятельность микроорганизмов и минерализации органического вещества в торфяных почвах с разным уровнем грунтовых вод / Т. Г. Зименко // Изв. АН СССР. Сер. биол. – 1972. – № 6. – С. 846–854.
25. Микробные ценозы торфяных почв и их функционирование / Т. Г. Зименко [и др.] ; под ред. Е. Н. Мишустина. – Минск : Наука и техника, 1983. – 181 с.
26. Степанов, А. Л. Продуцирование закиси азота бактериями в почвенных агрегатах / А. Л. Степанов, Н. А. Манучарова, Л. М. Полянская // Почвоведение. – 1997. – № 8. – С. 973–976.
27. Davidson, E. A. Soil responses to climate change / E. A. Davidson // NATO ASI ser. – 1994. – Vol. I, № 23. – P. 155–168.
28. High soil solution carbon and nitrogen concentrations in a drained Atlantic bog are reduced to natural levels by 10 years of rewetting / S. Frank [et al.] // Biogeochemistry. – 2014. – Vol. 11. – P. 2309–2324.
29. Reddy, R. Biogeochemistry of wetlands: science and applications / R. Reddy, R. D. DeLaune ; CRC Press, Taylor&Francis Group, 2008. – 805 p.
30. Soil CN ratio as a scalar parameter to predict nitrous oxide emissions / L. Klemmedtsson [et al.] // Global Change Biology. – 2005. – Vol. 11, iss. 7. – P. 1142–1147.
31. Рябчиков, А. М. Круговорот вещества в природе и его изменение хозяйственной деятельностью человека / А. М. Рябчиков. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1980. – 272 с.
32. Лебедь-Шарлевич, Я. И. Оценка и прогноз газогеохимического состояния и экологических функций почв на техногенных грунтах (на примере г. Москвы) : дис. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / Я. И. Лебедь-Шарлевич. – М., 2017. – 208 с.
33. Liao, T. The seasonal cycle of N₂O / T. Liao, C. D. Camp, Y. L. Yung // Geophysical Research Letters. – 2004. – Vol. 31. – L17108.
34. Оценка вертикальной адвекции при измерении потоков CO₂ над лесом с помощью метода вихревой ковариации / А. В. Ольчев [и др.] // Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии : тез. докл. Третьей Междунар. конф., Пущино, 4–8 июня 2007 г. – Пущино, 2007. – С. 56–57.
35. A multi-year record of airborne CO₂ observations in the US Southern Great Plains / S. C. Biraud [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2013. – № 6. – P. 751–763.
36. Soils, a sink for N₂O? A review / L. Chapuis-Lardy [et al.] // Global Change Biology. – 2007. – Vol. 13, № 1. – P. 1–17.
37. Потоки диоксида углерода, метана и закиси азота в почвах катены правобережья р. Ока (Московская область) / М. В. Семенов [и др.] // Почвоведение. – 2010. – № 5. – С. 582–590.

References

1. Yarmoshuk T. D., Rakovich V. A., Minke M., Tile A., Hofman M. *Emissii dioksida ugleroda s narushennih i vosstanavliyaemih bolotnih ekosistem* [Carbon dioxide emissions from disturbed and regenerated swamp ecosystems]. *Prirodopolzovanie = Nature Management*, 2014, no. 25, pp. 70–81. (in Russian)
2. Drösler M. Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystems, southern Germany. PhD thesis. München, Technischen Universität München Publ., 2005, 182 p.
3. Yarmoshuk T. D., Rakovich V. A., Minke M., Tile A. *Opredelenie emissii metana na torfyanom mestorojdenii nizinnogo tipa «Vigonoshchanskoe» s razlichnim urovнем zaleganiya gruntovih vod* [Determination of methane emissions at the fen peat deposit "Vigonoshchanskoe" with different levels of groundwater occurrence]. *Prirodopolzovanie = Nature Management*, 2013, no. 24, pp. 43–50. (in Russian)
4. Yarmoshuk T. D., Rakovich V. A., Minke M., Tile A. *Emissii zakisi azota na narushennih torfyanih mestorojdeniyah nizinnogo tipa* [Nitrous oxide emissions from disturbed fen peat deposits]. *Melioraciya = Land Reclamation*, 2014, no. 2 (72), pp. 122–137. (in Russian)
5. Peet R. K., Wentworth T. R., White P. S. A flexible, multipurpose method for recording vegetation composition and structure. *Castanea*, 1998, no. 63, pp. 262–274.
6. Couwenberg J., Augustin J., Michaelis D., Joosten H. Towards a field guide for the assessment of greenhouse gas emissions from Central European peatlands. *Emission reductions from rewetting of peatlands*. Greifswald University, 2008, 27 p.
7. Couwenberg J., Thiele A., Tanneberger F., et al. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia*, 2011, no. 674, pp. 67–89. doi:10.1007/s10750-011-0729-x
8. Jurasinski G., Koebisch F., Guenther A., Beetz S. Flux 0.3-0. Flux rate calculation from dynamic closed chamber measurements. R package version 0.3-0. Package 'flux', 25 April 2014, 60 p. Available at https://www.researchgate.net/publication/262248077_flux_03-0_Flux_rate_calculation_from_dynamic_closed_chamber_measurements (accessed 20 June 2023)
9. Lloyd J., Taylor J. A. On the temperature dependence of soil respiration. *Funct. Ecol.*, 1994, vol. 8, pp. 315–323.
10. Michaelis L., Menten M. L. Die Kinetik der Invertinwirkung. *Biochemische Zeitschrift*, 1913, no. 49, pp. 315–323.
11. Tanneberger F., Wichtman W. Carbon credits from peatland rewetting. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, 2011, 224 p.
12. Hendriks D. M. D. Integrated observations of greenhouse gas budgets at the ecosystem level. Amsterdam, Vrije Universiteit Publ., 2009, 203 p.

13. Orlov D. S., Sadovnikova L. K., Suhanova N. I. *Himiya pochv* [Soil Chemistry]. Moscow, 2005, 558 p. (in Russian)
14. Stepanov A. L. *Mikrobnaya transformaciya parnikovih gazov v pochvah* [Microbial transformation of greenhouse gases in soils]. Moscow, GEOS Publ., 2011, 192 p. (in Russian)
15. Shein E. V., Pozdnyakova A. D., Shvarov A. P., Ilin L. I., Sorokina N. V. *Gidrofizicheskie svoistva visokozolnih nizinnih torfyanih pochv* [Hydrophysical properties of high-ash fen peat soils]. *Pochvovedenie = Soil Science*, 2018, no. 10, pp. 1259–1264. (in Russian)
16. IPCC, 2013. Climate change: The Physical science basis. contribution of working group to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Eds. T. F. Stocker et al. New York, Cambridge University Press Publ., 2013, 1535 p.
17. Hiraishi T., et al. (eds). IPCC 2014, 2013 – Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland, 2014, 354 p.
18. Minke M., Freibauer A., Yarmoshuk T., Burlo A. Flooding of an abandoned fen by beaver led to highly variable greenhouse gas emissions. *Mires and Peat*, 2020, vol. 26, article 23, pp. 1–24. doi:10.19189/MaP.2019.SNPG.StA.1808
19. Wilson D., Blain D., Couwenberg J., Evans C. D., Murdiyarso D., Page S. E., Renou-Wilson F., Rieley J. O., Sirin A., Strack M. and Tuittila E.-S. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat*, 2016, vol. 17, article 04, pp. 1–28. doi:10.19189/MaP.2016.OMB.222
20. Kudryarov V. N., et al. *Puli i potoki ugleroda v nazemnih ekosistemah Rossii* [Carbon pools and fluxes in terrestrial ecosystems of Russia]. *Institut fiz.-him. i biol. problem pochvovedeniya RAN = Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science RAS*. Moscow, Nauka Publ., 2007, 315 p. (in Russian)
21. Makarov B. N. *Gazovii rejim pochvi* [Gas regime of the soil]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988, 103 p. (in Russian)
22. Vallen K. H., Bas Ch., Berkestrem A., Kolmaier G. *Uglekislii gaz v atmosfere* [Carbon dioxide in the atmosphere]. Ed. V. Baha, A. Kreina, A. Berje, A. Longetto. Moscow, Mir Publ., 1987, 534 p. (in Russian)
23. Kudryarov V. N. *Azotnii cikl i produkcirovanie zakisi azota* [Nitrogen cycle and production of nitrous oxide]. *Pochvovedenie = Soil Science*, 1999, no. 8, pp. 988–998. (in Russian)
24. Zimenko T. G. *Deyatelnost mikroorganizmov i mineralizacii organicheskogo veshchestva v torfyanih pochvah s raznim urovнем gruntovih vod* [Activity of microorganisms and mineralization of organic matter in peat soils with different groundwater levels]. *Izvestiya AN SSSR, Seriya biol. = Izvestia of the USSR Academy of Sciences, Biological series*, 1972, no. 6, pp. 846–854. (in Russian)
25. Zimenko T. G., Samsonova A. S., Misnik A. G., Gavrilkina N. V., Filipshanova L. I. *Mikrobnie cenozi torfyanih pochv i ih funkcionirovanie* [Microbial cenoses of peat soils and their functioning]. Minsk, 1983, 181 p. (in Russian)
26. Stepanov A. L., Manucharova N. A., Polyanskaya L. M. *Producirovanie zakisi azota bakteriyami v pochvennih agregatah* [Production of nitrous oxide by bacteria in soil aggregates]. *Pochvovedenie = Soil Science*, 1997, no. 8, pp. 973–976. (in Russian)
27. Davidson E. A. Soil responses to climate change. *NATO ASI ser.*, 1994, vol. I, no. 23, pp. 155–168.
28. Frank S., Tiemeyer B., Gelbrecht J., Freibauer A. High soil solution carbon and nitrogen concentrations in a drained Atlantic bog are reduced to natural levels by 10 years of rewetting. *Biogeochemistry*, 2014, vol. 11, pp. 2309–2324. doi:10.5194/bg-11-2309-2014
29. Reddy R., DeLaune R. D. *Biogeochemistry of Wetlands: science and applications*. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2008, 805 p.
30. Klemetsson L., Arnold K. V., Weslien P., Gundersen P. Soil CN ratio as a scalar parameter to predict nitrous oxide emissions. *Global Change Biology*, 2005, vol. 11, iss. 7, pp. 1142–1147.
31. Ryabchikov A. M. *Krugovorot veshchestva v prirode i ego izmenenie hozyaistvennoi deyatel'nostyu cheloveka* [The circulation of matter in nature and its change by human economic activity]. Moscow, Moscow University Publ., 1980, 272 p. (in Russian)
32. Lebed-Sharlevich Ya. I. *Ocenka i prognoz gazogehimicheskogo sostoyaniya i ekologicheskikh funktsii pochv na tehnogennih gruntah (na primere g. Moskvi)*. Dis. ... kand. biol. nauk [Assessment and forecast of the gas-geochemical state and ecological functions of soils on technogenic soils (on the example of Moscow). Dr. biol. sci. diss.]. Moscow, 2017, 208 p. (in Russian)
33. Liao T., Camp C. D., Yung Y. L. The seasonal cycle of N₂O. *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31, L17108.
34. Olchev A. V., Kurbatova Yu. A., Varlagin A. V., Vigodskaya N. N. *Ocenka vertikalnoi advekcii pri izmerenii potokov CO₂ nad lesom s pomoshchyu metoda vikhrevoi kovariatsii* [Estimation of vertical advection when measuring CO₂ fluxes over a forest using the vortex covariance method]. *Emissiya i stok parnikovih gazov na territorii severnoi Evrazii. Tez. dokl. Tret'ei Mejdunar. konf.* [Proc. of Third Int. Conf. 'Greenhouse Gas Emissions and Runoff in Northern Eurasia']. Puschino, 2007, pp. 56–57. (in Russian)
35. Biraud S. C., Torn M. S., Smith J. R., Sweeney C., Riley W. J., Tans P. P. A multi-year record of airborne CO₂ observations in the US Southern Great Plains. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6, pp. 751–763.
36. Chapuis-Lardy L., Wrage N., Metay A., Chotte J.-L., Bernoux M. Soils, a sink for N₂O? A review. *Global Change Biology*, 2007, vol. 13, no. 1, pp. 1–17.
37. Semenov M. V., Kravchenko I. K., Semenov V. M., Kuznecova T. V., Dulov L. E., Udalcov S. N., Stepanov A. L. *Potoki dioksida ugleroda, metana i zakisi azota v pochvah kateni pravoberejya r. Oka (Moskovskaya oblast)*

[Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in the soils of the catena of the right bank of the river. Oka (Moscow region)]. *Pochvovedenie = Soil Science*, 2010, no. 5, pp. 582–590. (in Russian)

Информация об авторе

Ярмошук Татьяна Донатовна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: t.yarmoshuk@rambler.ru

Information about the author

Tatsiana D. Yarmoshuk – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: t.yarmoshuk@rambler.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-55-66>
УДК 504.455.06(1/9)

Поступила в редакцию 23.09.2023
Received 23.09.2023

ОЦЕНКА БИОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИГОРОДНЫХ ВОДОЕМОВ ВИЛЕЙСКО-МИНСКОЙ ВОДНОЙ СИСТЕМЫ

М. И. Струк, С. Г. Живнач

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлена оценка биогенного загрязнения водохранилищ Вилейско-Минской водной системы: Вилейского, Заславского, Криница, Дрозды. Рассмотрены внутренние и внешние факторы формирования качества их вод, включая гидрологические параметры самих водоемов и экологическое состояние их водосборных бассейнов. Установлено более благоприятное сочетание этих факторов для Вилейского водохранилища за счет большего объема его водной массы и высокой лесистости водосбора.

Определены уровни и сезонные особенности общей минерализации вод рассматриваемых водохранилищ и концентрации в них биогенных веществ. Выявлена максимальная минерализация для всех водоемов в зимний сезон и более высокая повторяемость биогенного загрязнения для больших водохранилищ – Заславского (37 % случаев) и Вилейского (35 %), по сравнению с малыми – Криница и Дрозды (в каждом по 22 % случаев). Показано превышение экологических норм содержания в водах водохранилищ веществ, вызывающих их эвтрофирование.

Предложены водоохранные меры по снижению поступления в водоемы биогенных веществ, включая разработку и реализацию для них бассейновых планов управления, внедрение почвозащитных технологий обработки сельскохозяйственных земель и совершенствование технологий внесения удобрений, создание и соблюдение режимов водоохранных зон.

Ключевые слова: водохранилище; водосборный бассейн; биогенное загрязнение; антропогенное эвтрофирование; водоохранные меры.

Для цитирования. Струк М. И., Живнач С. Г. Оценка биогенного загрязнения пригородных водоемов Вилейско-Минской водной системы // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 55–66.

ASSESSMENT OF BIOGENIC POLLUTION OF THE SUBURBAN RESERVOIRS OF VILEYSKO-MINSKAYA WATER SYSTEM

M. I. Struk, S. G. Zhivnach

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

Abstract. The assessment of the biogenic pollution of the reservoirs of Vileysko-Minskaya water system: Vileyskoye, Zaslavskoye, Krinitza, Drozdzy is presented. The internal and external factors of their waters quality formation, including the hydrological parameters of the reservoirs themselves and the ecological state of their catchment basins, are considered. More favorable combination of these factors has been established for Vileyskoye reservoir due to the larger volume of its water mass and the high forest cover of the catchment basins.

The levels and seasonal features of the total mineralization of the waters of the reservoirs under consideration and the concentration of nutrients in them are determined. The maximum mineralization for all reservoirs in winter season and higher repeatability of biogenic pollution for large reservoirs – Zaslavskoye (37 % of cases) and Vileyskoye (35 %), compared with small ones – Krinitza and Drozdzy (each has 22 % of cases) were identified. The excess of the environmental standards of the substances content in the waters of reservoirs that cause their eutrophication is shown.

Water protection measures are proposed to reduce the flow of biogenic substances into reservoirs, including the development and implementation of basin management plans for them, the introduction of soil protection technologies for processing agricultural land and improving fertilizer application technologies, the creation and observance of water protection zone regimes.

Keywords: reservoir; catchment basin; biogenic pollution; anthropogenic eutrophication; water protection measures.

For citation. Struk M. I., Zhivnach S. G. Assessment of biogenic pollution of the suburban reservoirs of Vileysko-Minskaya water system. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 55–66.

Введение. Функционирование крупнейшего города сопровождается вовлечением для его нужд водных объектов, расположенных на как собственно городской, так и пригородной территории. По отношению к Минску последним принадлежит ведущая роль, в силу размещения города на водораздельной возвышенности, следствием чего является отсутствие в его пределах и ближайшем окружении достаточно больших водотоков и водоемов, способных обеспечить его водохозяйственные и рекреационные потребности.

Для удовлетворения указанных потребностей на малой р. Свислочи в городской черте, а также на реках пригородной территории были построены водохранилища. В их составе наиболее высокой интенсивностью водохозяйственного и рекреационного использования выделяются водоемы Вилейско-Минской водной системы (ВМВС). Из этих водоемов осуществляется питьевое и промышленное водоснабжение г. Минска; в созданных на их базе зонах отдыха сосредоточено почти 2/3 рекреационно-оздоровительных объектов пригородной территории и концентрируется более половины неорганизованных отдыхающих [1].

Отмеченная водная система была введена в эксплуатацию в 1976 г. Она представляет собой комплекс гидротехнических сооружений, включающий Вилейское водохранилище как водоем-донор, канал для переброски воды с пятью насосными станциями, каскад искусственных водоемов на р. Свислочи, представленный водохранилищами Заславское, Криница и Дрозды.

Эффективность выполнения водохранилищами водохозяйственной и рекреационной функций в решающей степени зависит от качества их вод. В данном отношении основной проблемой рассматриваемых водохранилищ является их антропогенное эвтрофирование, обусловленное избыточным поступлением в водоемы биогенных веществ – соединений азота и фосфора. Оно вызывает «цветение» воды в летний период в пик купального сезона, когда вода хорошо прогревается, затем происходят отмирание и разложение сине-зеленых водорослей, что сопровождается ухудшением качества воды.

Экологическому состоянию водохранилищ ВМВС уделялось внимание ранее в публикациях, посвященных оценке химического загрязнения Вилейского водохранилища [2]; водохранилища Дрозды [3], пригородных водоемов Минска [4–6]. Вместе с тем полученные оценки нуждаются в дополнении для уточнения водоохраных мер по улучшению экологического состояния водохранилищ.

Цель работы – дать оценку биогенного загрязнения водоемов ВМВС и обосновать меры по его снижению. Для ее достижения решались задачи по оценке факторов такого загрязнения, а также выявлению его интенсивности, вещественного состава и сезонных особенностей как научной основы выбора подобного рода мер.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования выступили водохранилища ВМВС, расположенные на пригородной территории Минска: Вилейское, Заславское, Криница, Дрозды, а также р. Вилия с притоками Илия и Сервечь и р. Свислочь, на которых эти водохранилища построены (рис. 1).

Методическую основу исследования составило применение бассейнового подхода в сочетании с методикой гидрохимической оценки водоемов. Алгоритм исследования включил в себя последовательное выполнение таких этапов, как:

- картографирование бассейнов изучаемых водохранилищ;
- оценка факторов, влияющих на их гидрохимическое состояние;
- оценка биогенного загрязнения водных объектов и его зависимости от водосборных бассейнов;
- обоснование водоохраных мер для каждого из исследуемых водохранилищ.

Для изучаемых водохранилищ и рек, на которых они построены, определяли общую минерализацию вод, а также концентрацию четырех биогенных веществ: нитратов, нитритов, азота аммонийного, фосфора фосфатов. Принимая во внимание особую значимость проблемы антропогенного эвтрофирования водохранилищ, для выявления их подверженности данному процессу использовали две группы критериев. Первую из них составили оценочные критерии, которые опираются на показатели предельно допустимой концентрации (ПДК), установленные для водоемов рыбохозяйственного назначения, вторую – экологические критерии оценки качества водных объектов [7–9].

Исходные данные о концентрации в водных объектах химических веществ авторы получили в результате полевых исследований, проведенных во все сезоны года в период с 2009 по 2022 г. Водные пробы отбирали в водохранилищах, а также в реках выше и ниже водохранилищ. Всего отобрали и проанализировали 172 пробы.

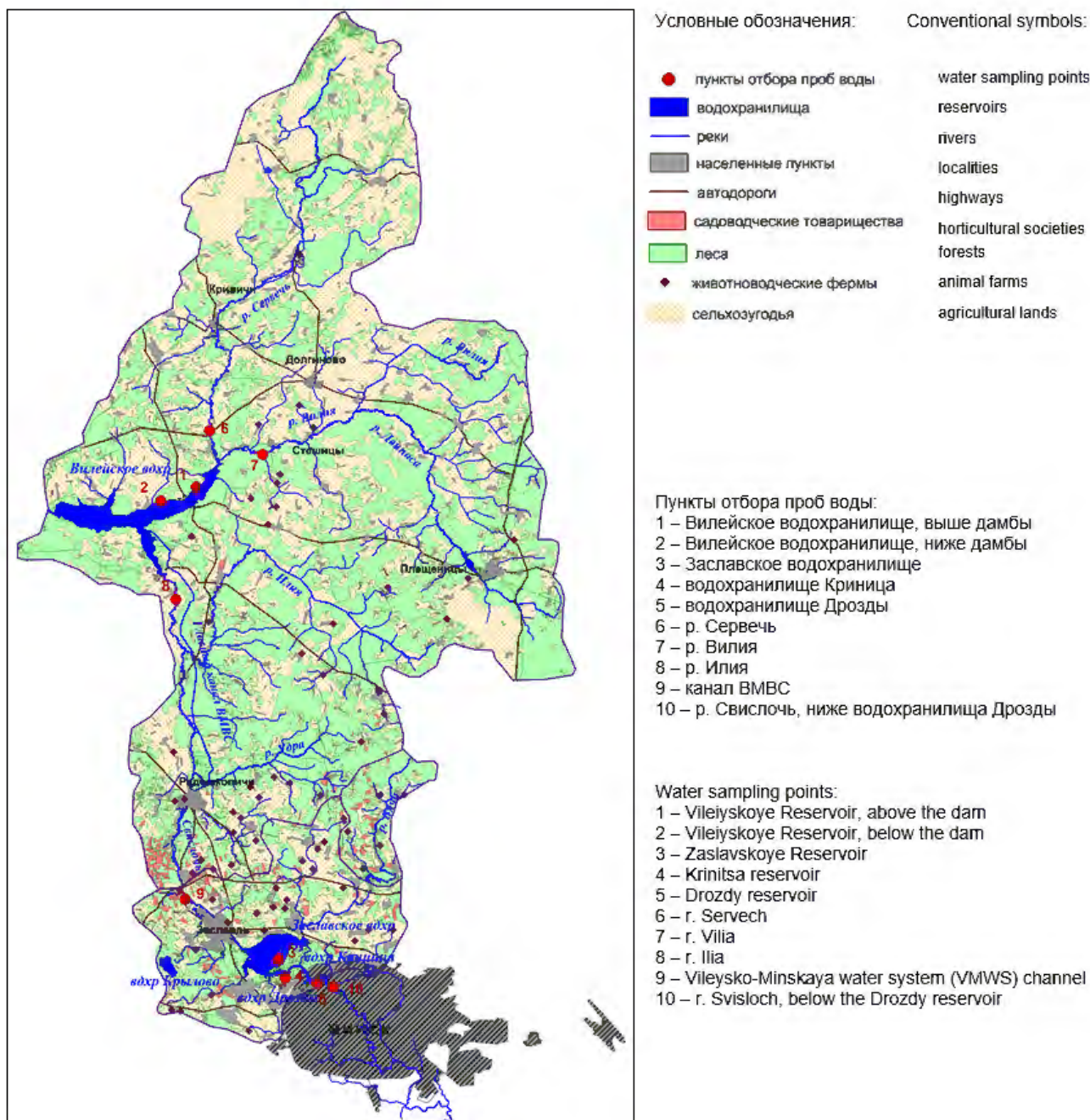


Рис. 1. Пункты отбора проб воды на водных объектах ВМВС

Fig.1. Water sampling points at the water bodies of the VMWS

Результаты исследования.

Факторы, оказывающие влияние на гидрохимическое состояние водоемов ВМВС. На химический состав вод водохранилища оказывают влияние две группы факторов: внутренние и внешние. Первые из них связаны с его гидрологическими параметрами, вторые – с экологическим состоянием водосборных бассейнов.

Внутренние факторы. В составе рассматриваемых водохранилищ выделяются два крупных – Вилейское и Заславское и два малых – Криница и Дрозды. Вилейское водохранилище вообще является самым большим искусственным водоемом Беларуси. Его площадь составляет 63,8 км², максимальная глубина – 13 м, длина – 27 км, ширина – 3 км. Заславское водохранилище – второй по величине искусственный водоем в стране площадью 25,6 км². Его наибольшая глубина составляет 8,6 м, длина – 9 км, ширина – 4 км.

Водохранилища Криница и Дрозды являются продолжением Заславского водохранилища. Они характеризуются схожими параметрами. Первое из них имеет площадь 0,96 км², наибольшую глубину – 5,2 м, длину – 2,8 км, ширину – 0,7 км. Второе – 2,1 км², 6 м, 6 км, 0,6 км соответственно [10, 11].

Заславское водохранилище наполняется за счет водных ресурсов, поступающих из нескольких источников: во-первых, формирующей его малой реки Свислочи с притоками Вяча, Чернявка, Ратомка, Поплав; во-вторых, канала Вилейско-Минской водной системы. Вклад первого из этих источников составляет 3,2 м³/с.

Поступление водных ресурсов из канала ВМВС в р. Свислочь, согласно проекту в маловодном году 95%-ной обеспеченности летом должен был составлять 17 м³/с, зимой – 12,85 м³/с. Для этого необходимый годовой объем переброски части стока из Вилейского водохранилища в р. Свислочь определялся в 382 млн м³, или 12,1 м³/с. В начале 2000-х годов переброска стока из Вилейского водохранилища в бассейн р. Свислочи снизилась в среднем до 5,3 м³/с [12]. В последнее десятилетие, по данным УП «Минскводоканал», она уменьшилась до 3,2 м³/с [13].

К основным гидрологическим параметрам водохранилища, определяющим его устойчивость к внешним воздействиям, относятся объем воды, проточность и глубина [14, 15]. От объема воды зависит разбавляющая способность водоема, от проточности – образование застойных явлений, от глубины – температура воды, оказывающая влияние на эвтрофирование.

Рассматриваемые водохранилища имеют большие различия по своим гидрологическим параметрам (табл. 1). Максимальной величиной объема водной массы отличаются водохранилища Вилейское и Заславское, у которых он составляет 238 и 100 млн м³ соответственно. С последним непосредственно связаны водохранилища Криница и Дрозды, объем которых существенно меньше – 1,8 млн м³ у первого и 5,7 млн м³ у второго.

Таблица 1. Факторы формирования качества воды водохранилищ ВМВС

Table 1. Factors of the water quality formation of VMWS reservoirs

Показатель	Водохранилище			
	Вилейское	Заславское	Криница	Дрозды
<i>Гидрологические параметры водохранилища</i>				
Объем воды, млн м ³	238	100	1,8	5,7
Водообмен, раз за год	2	3,2	122	52
Средняя глубина, м	3,7	3,9	1,9	2,7
<i>Экологическое состояние водосборного бассейна</i>				
Площадь, км ²	4120	562	610	649
Доля ландшафтов (%):				
возвышенных	23	74	74	74
равнинных	58	15	15	15
низинных	19	11	11	11
Потенциальный смыл почвы, т/га	3,0	4,3	4,3	4,3
Лесистость, %	48	29	29	29
Доля земель, %:				
сельскохозяйственных	39	45	45	45
занятых сельскими поселениями	5	14	14	14
занятых садоводческими товариществами	0,5	4	4	4

Показатель средней глубины более высокий у крупных водохранилищ – почти 4 м, у малых водохранилищ он в 1,4–2,0 раза меньше. По проточности соотношения обратные, соответствующие показатели малых водохранилищ в десятки раз превосходят таковые больших. В то же время даже присущий Вилейскому водохранилищу минимальный водообмен (2 раза в год) соответствует установленным нормам для водохранилищ рекреационного назначения [15–17].

Принимая во внимание приведенные гидрологические параметры исследуемых водохранилищ, можно определить их устойчивость к загрязнению как сравнительно высокую. Для Вилейского и Заславского водохранилищ подобную степень устойчивости обеспечивает большой объем водной массы, для водохранилищ Криница и Дрозды, которые являются по сути продолжением Заславского водохранилища, – высокая проточность.

Отмеченная устойчивость водохранилищ к загрязнению отражает лишь предпосылки его проявления. Их реальное экологическое состояние будет зависеть также от количества поступающих загрязняющих веществ и специфики происходящих в каждом из водохранилищ гидрологических, гидрохимических и гидробиологических процессов.

Внешние факторы. Исследуемые пригородные водохранилища построены на малых реках, что обуславливает повышенную зависимость качества их вод от экологического состояния водосборных бассейнов. Длина рек до верхнего бьефа водохранилищ Заславское, Криница, Дрозды не превышает 30 км. Применительно к Вилейскому водохранилищу, которое создано в месте слияния трех рек – Сервечи, Вилии и Илии, она повышается до 60–75 км.

Вилейское водохранилище выделяется также самой большой площадью водосборного бассейна – 4,1 тыс. км². У водохранилищ, построенных на р. Свислочь, она меньше в 6–7 раз.

Для оценки экологического состояния водосборных бассейнов вначале рассмотрено их природно-ландшафтное строение, от которого зависит хозяйственное освоение территории, а также специфика поступления загрязняющих веществ в водные объекты; затем характер этого освоения, видовая структура земель, наличие и размещение источников загрязнения вод, а также лесистость как элемент экологической стабилизации.

Ландшафтную структуру изучаемых бассейнов формируют ландшафты трех высотных уровней: возвышенные, равнинные и низинные. В пределах водосборного бассейна Заславского водохранилища преобладают возвышенные холмисто-моренно-эрозионные ландшафты, занимающие 3/4 территории, наибольшая доля приходится на подвид данных ландшафтов с покровом лёссовидных суглинков, которые отличаются самой высокой эрозионной опасностью.

В бассейне Вилейского водохранилища холмисто-моренно-эрозионные ландшафты занимают только шестую часть территории. Для него в наибольшей мере характерны вторично-моренные ландшафты (около 2/3 территории). При этом бассейны каждой из формирующих данное водохранилище рек имеют свои особенности.

Для бассейнов рек Вилии и Сервечи отмечается схожая ландшафтная структура, с наибольшей долей вторично-моренных ландшафтов (более половины территории). В бассейне р. Двиносы примерно равные доли территории (около 1/3) приходятся на вторично-моренные и камово-моренно-эрозионные ландшафты. В бассейне р. Илии преобладают холмисто-моренно-эрозионные ландшафты (половина территории).

Опираясь на ландшафтную структуру водосборных бассейнов, можно определить основные потенциальные каналы поступления загрязняющих веществ в водные объекты. Для бассейнов с высокой долей возвышенных ландшафтов, которые характеризуются высокой интенсивностью почвенной эрозии, но большей степенью защищенности грунтовых вод, приоритетным каналом такого рода выступит поверхностный сток. Для бассейнов с преобладанием низинных ландшафтов, характеризующихся слабой подверженностью эрозии и низкой защищенностью грунтовых вод – подземный сток. Для бассейнов, занятых в основном равнинными ландшафтами, где сочетаются умеренная эрозионная опасность и такая же защищенность грунтовых вод, – оба названных канала.

Принимая во внимание приведенные особенности ландшафтной структуры водосборных бассейнов рассматриваемых водохранилищ, можно заключить, что для водохранилищ Заславское, Криница, Дрозды основным потенциальным каналом загрязнения вод выступит поверхностный сток. Для Вилейского водохранилища загрязняющее значение поверхностного и подземного стока будет примерно равнозначным.

Величина поступления загрязняющих веществ с поверхностным стоком в водоемы будет зависеть от интенсивности эрозионных процессов. Для ее определения выполнены расчеты потенциального выноса почв с территории водосборов и доли эрозионных форм в их пределах (табл. 2).

Таблица 2. Интенсивность эрозионных процессов на территории водосборных бассейнов рек и водохранилищ ВМВС

Table 2. Intensity of erosion processes in the drainage basins of rivers and reservoirs of the VMWS

Бассейны рек и водохранилищ	Возможный вынос почвы с водосбора, т/га	Доля эрозионных форм, %
Вилейское вдхр., в том числе:	3,0	2,3
р. Вилия	3,8	2,2
р. Илия	6,9	2,6
р. Двиноса	5,3	1,3
р. Сервечь	2,3	2,4
Заславское вдхр. (включая вдхр. Криница, Дрозды)	4,3	3,0

Возможный смыв почвы, а также доля эрозионных форм в бассейне Заславского водохранилища составляют 4,3 т/га и 3,0 % соответственно, что выше аналогичных показателей бассейна Вилейского водохранилища в 1,4 и 1,3 раза. Внутри последнего разница в интенсивности потенциального выноса почв между его составными частями довольно велика: в бассейне р. Илии она достигает максимального значения – 6,9 т/га, что в 3 раза выше, нежели в бассейне р. Сервечь.

В пределах рассматриваемых водосборных бассейнов наибольшие площади занимают сельскохозяйственные земли и леса (см. рис. 1). Их совместная доля превышает 70 %. При этом в бассейне Заславского водохранилища площадь сельскохозяйственных земель превышает таковую лесов, у Вилейского водохранилища – наоборот.

Характерной особенностью бассейнов, которые расположены ближе к городу, является их высокая занятость населенными пунктами и садоводческими товариществами. Суммарная доля таковых в бассейне Заславского водохранилища составляет 18 %, у более отдаленного бассейна Вилейского водохранилища она в 2,3 раза ниже – 8 %.

Животноводческие объекты на территории водосборных бассейнов представлены, главным образом, фермами крупного рогатого скота. Плотность животноводческих ферм зависит от степени сельскохозяйственного освоения бассейнов. Более высокое ее значение приходится на бассейн Заславского водохранилища – 5 объектов на 100 км², низкое – на бассейн Вилейского водохранилища – 1 объект на 100 км².

Сельскохозяйственные земли вместе с землями населенных пунктов отражают уровень антропогенного преобразования бассейнов. Леса, наоборот, характеризуют их естественный водорегулирующий и водоохраный потенциал. Исследуемые водохранилища характеризуются высоким (Вилейское) и средним (Заславское, Криница, Дрозды) значением этого потенциала.

Опираясь на рассмотренные особенности ландшафтной структуры, видов земель, проявления эрозионных процессов, размещения источников загрязнения вод в водосборных бассейнах пригородных водохранилищ, можно разделить их по потенциальной опасности такого загрязнения. В меньшей степени она будет проявляться у бассейна Вилейского водохранилища за счет высокой лесистости и низкой доли сельскохозяйственного освоения и застройки. Более высокой опасностью загрязнения будут характеризоваться бассейны водохранилищ, расположенных на р. Свислочи, – Заславского, Криница и Дрозды. Они отличаются сравнительно низкими показателями лесистости и высокими – застройки, сельскохозяйственного освоения и эрозионной опасности.

Совместный учет приведенного экологического состояния водосборных бассейнов и представленных выше гидрологических свойств самих пригородных водохранилищ дает основание для оценки предпосылок формирования качества вод. Более благоприятными они будут у Вилейского водохранилища, которое отличается сочетанием высокой лесистости водосбора и такого же объема водной массы. Менее благоприятными – у водохранилищ Заславское и связанных с ним водохранилищ Криница и Дрозды, где показатели лесистости бассейнов и объема водной массы ниже.

Оценка биогенного загрязнения водоемов ВМБС. Для определения влияния водосборного бассейна на гидрохимическое состояние водохранилища рассмотрена минерализация воды в трех створах, расположенных в такой последовательности: «река выше водохранилища – водохранилище – река ниже водохранилища». Самое высокое значение соответствующего показателя получено в р. Свислочи выше водохранилища и самое низкое – в водохранилищах Заславское, Криница, Дрозды (рис. 2, а). Подобное его распределение свидетельствует о том, что отмеченное влияние бассейна является решающим. Кроме того, в нем также находит отражение своеобразная опресняющая роль водохранилища. Для оценки вклада речных вод в поступление химических веществ для Вилейского водохранилища тоже отбирались пробы из наполняющих его рек – Вилии, Илии, Сервечи. Минерализация рек и самого водохранилища оказались примерно на одном уровне (рис. 2, б).

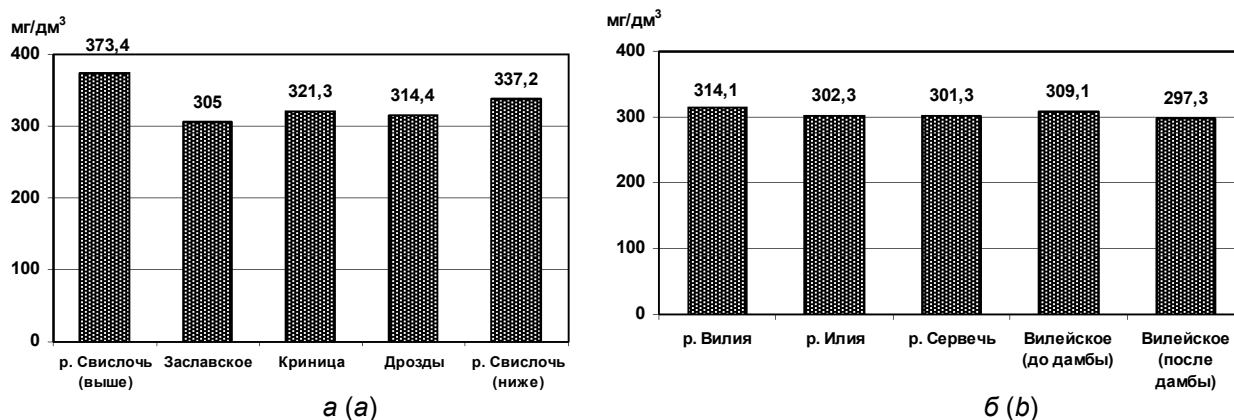


Рис. 2. Среднегодовая минерализация вод водохранилищ Заславское, Криница, Дрозды, реки Свислочи (а) и Вилейского водохранилища и связанных с ним рек (б)

Fig. 2. Average annual mineralization of the waters of the Zaslavskoye, Krinitsa, Drozdoye reservoirs, the Svisloch River (a) and the Vileykoye reservoir and associated rivers (b)

В сезонном распределении минерализации воды в водохранилищах прослеживается внутригодовая динамика от наибольшей ее величины зимой до наименьшей – летом (Заславское, Криница, Дрозды) и весной в период снеготаяния (Вилейское) (рис. 3). Более высокая минерализация в зимний период соответствует гидрохимическому режиму озер Беларуси [18]. Для Вилейского водохранилища отбор проб осуществлялся из двух его частей – выше и ниже разделяющей водохранилище дамбы, что соответствует разным гидрологическим зонам районирования Вилейского водохранилища по условиям седиментации [2, 15]. За период с 2009 по 2022 г. в среднем минерализация вод водохранилища была несколько выше в верхней его части, до дамбы (см. рис. 3).

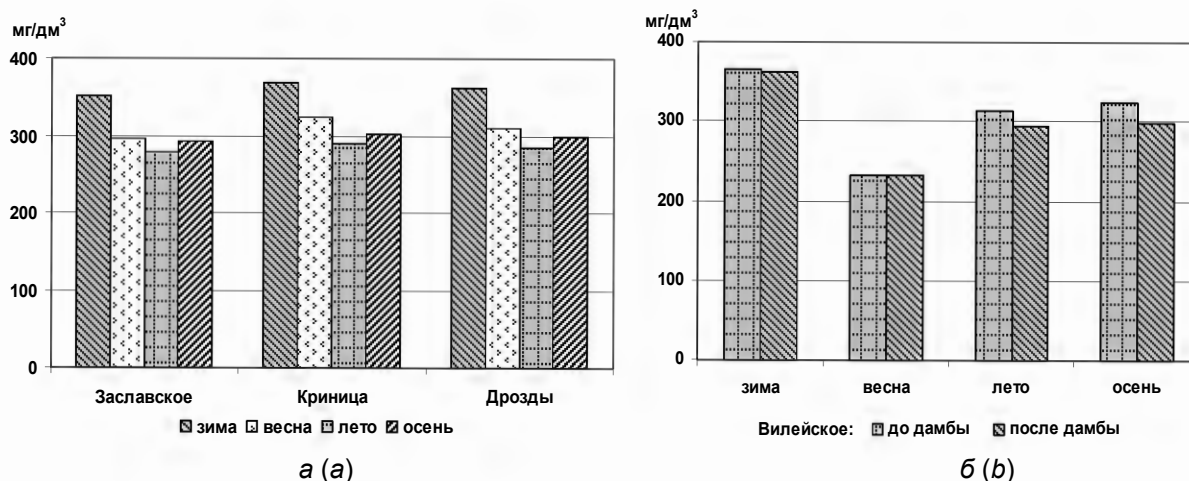


Рис. 3. Среднегодовая минерализация вод водохранилищ Заславское, Криница, Дрозды (а) и Вилейское (б) по сезонам года

Fig. 3. Average annual mineralization of waters of the Zaslavskoye, Krinitsa, Drozdy (a) and Vileyskoye (b) reservoirs by season

Для оценки биогенного загрязнения рек и водохранилищ выполнены расчеты среднегодовых концентраций каждого из биогенных веществ по всем трем створам. Кроме того, определялась также частота случаев превышения ПДК.

В водохранилищах Заславское, Криница, Дрозды среднегодовых концентраций биогенных веществ выше ПДК не выявлено. Так, содержание нитритов ниже $0,08 \text{ мг/дм}^3$ (ПДК), азота аммонийного – ниже $0,39$, нитратов – ниже 40 , фосфора фосфатов – ниже $0,066 \text{ мг/дм}^3$ (рис. 4). По всем веществам они находятся на схожем уровне.

В то же время по содержанию различных веществ в реке выше и ниже водохранилища отмечаются различия. Если по азоту аммонийному и нитратам оно является более высоким в реке выше водохранилища, что аналогично распределению показателя общей минерализации, то по нитритам и фосфору фосфатов наоборот более высокие значения фиксируются в реке ниже водохранилища. В последнем случае опресняющая роль водохранилища не прослеживается.

Концентрация биогенных элементов в воде Вилейского водохранилища и рек, его питающих, находится на том же уровне, что и для остальных пригородных водохранилищ. По среднегодовому содержанию большинства биогенных элементов Вилейское водохранилище характеризуется более низкими концентрациями по сравнению с остальными водохранилищами: концентрация нитритов составляет $0,053 \text{ мг/дм}^3$, азота аммонийного – $0,25$, фосфора фосфатов – $0,013 \text{ мг/дм}^3$. Исключение составляют нитраты, их содержание в нем достигает $6,4 \text{ мг/дм}^3$, что в 1,2 раза выше.

Для определения влияния подземных вод, питающих водохранилище, на его гидрохимическое состояние отбирались пробы воды из двух колодцев вблизи Вилейского водохранилища, находящихся на различном гипсометрическом уровне и удалении от водоема (60 м и 180 м). Установлено, что общая минерализация вод колодцев в среднем в 1,6 раза выше, чем вод водохранилища (рис. 5). Для обоих колодцев выявлено существенное нитратное загрязнение (максимальное зафиксированное – $9,8$ ПДК), которое значительно (в 5–7 раз) снизилось за период наблюдений, что может быть обусловлено изменениями условий ведения хозяйства на прилегающих территориях – прекращением содержания животных в личных подсобных хозяйствах.

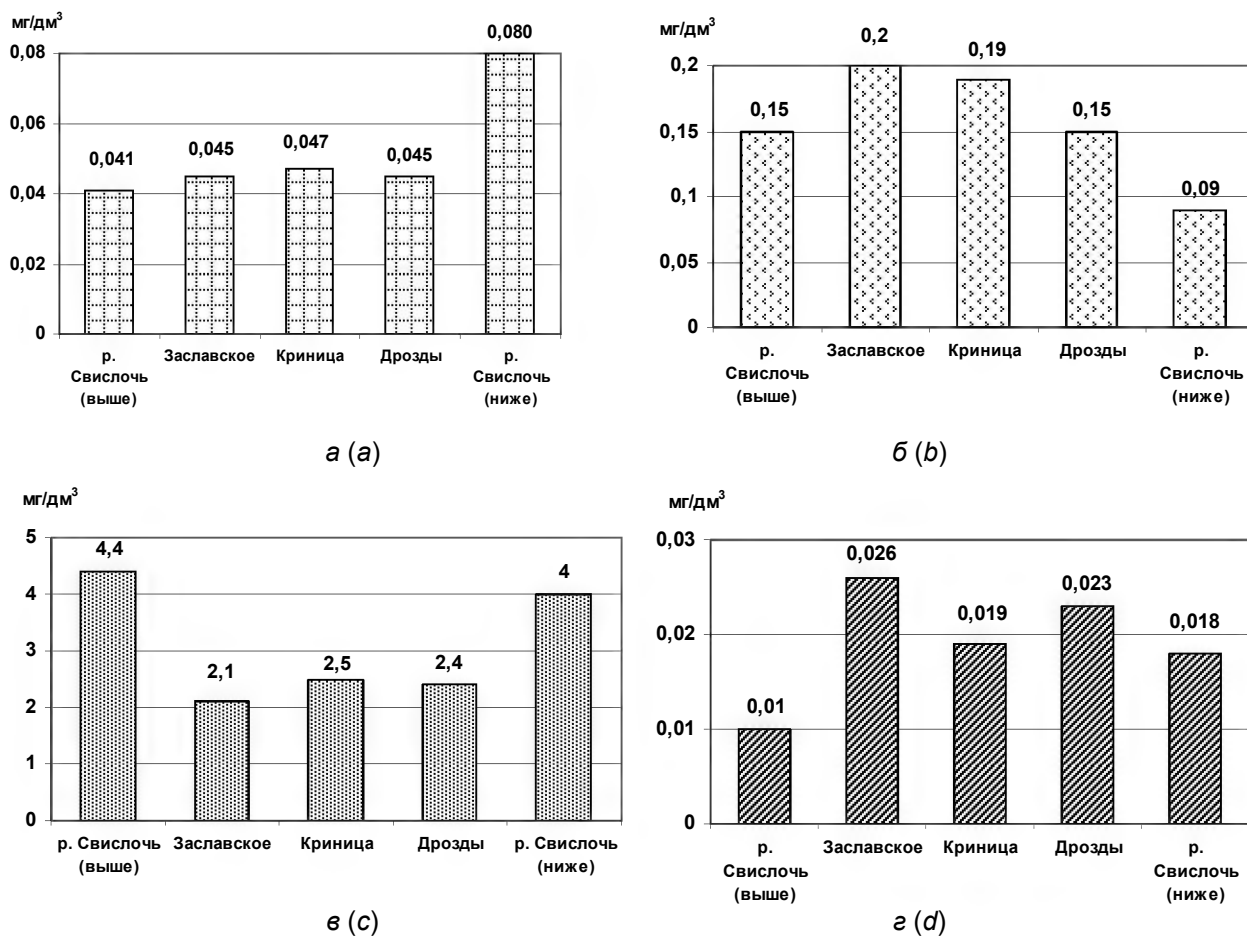


Рис. 4. Среднегодовые концентрации нитритов (а), аммонийного азота (б) и нитратов (в) и фосфора фосфатов (г) в воде водохранилищ Заславское, Криница, Дрозды и в р. Свислочи

Fig. 4. Average annual concentrations of nitrites (a), ammonium nitrogen (b) and nitrates (c) and phosphorus phosphates (d) in the water of the Zaslavskoye, Krinitsa, Drozdoy reservoirs and in the river Svisloch

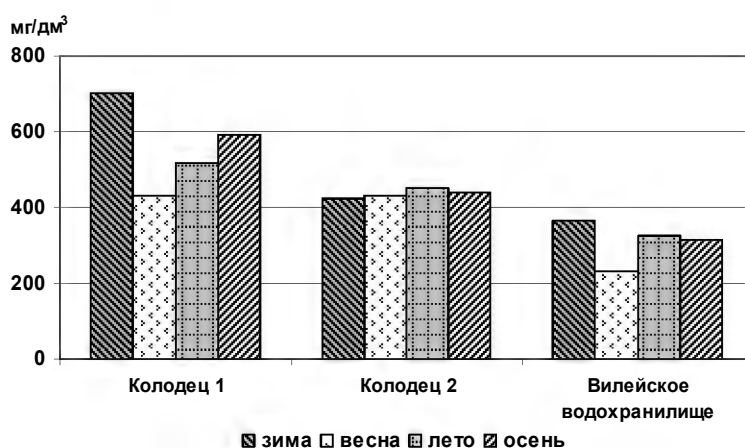


Рис. 5. Среднегодовая минерализация вод Вилейского водохранилища и расположенных вблизи водохранилища колодцев, мг/дм³

Fig. 5. Average annual mineralization of the waters of the Vileyskoye reservoir and wells located near the reservoir, mg/dm³

За период наблюдений в воде всех водоемов периодически фиксировались разовые превышения ПДК по азоту аммонийному, азоту нитритному, фосфору фосфатов (рис. 6). Их повторяемость была более высокой у крупных водоемов. Общая доля отобранных проб с превышением ПДК по всем веществам составила 37 % для Заславского и 34 % для Вилейского водохранилища, что соответственно в 1,9 и 1,4 раза больше, нежели у водохранилищ Криница и Дрозды (по 22 % в каждом).

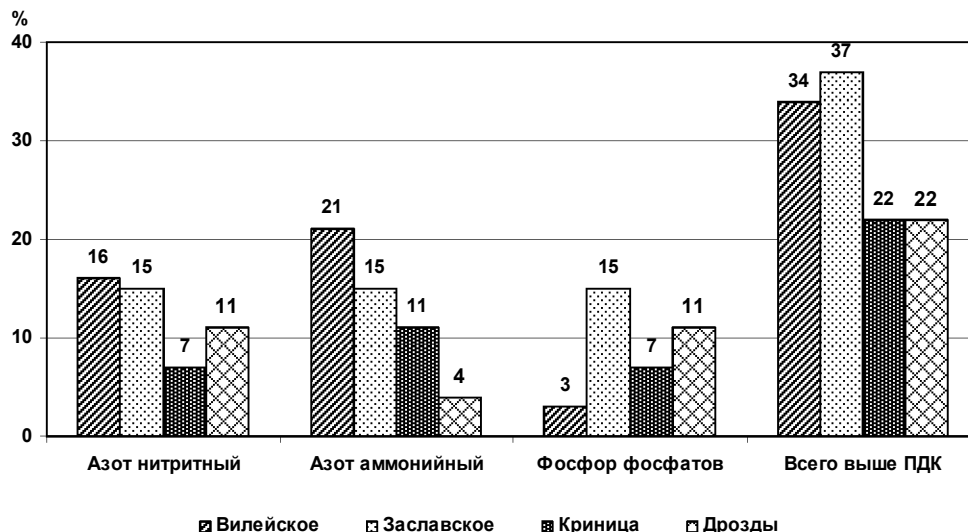


Рис. 6. Частота превышения ПДК биогенных элементов в воде водохранилищ ВМБС, %

Fig. 6. Frequency of exceeding the maximum permissible concentration of nutrients in the water of VMWS reservoirs, %

В вещественном составе загрязнения максимальный уровень превышения норм отмечался для фосфора фосфатов – 3 ПДК (Заславское водохранилище). Для азота нитритного он составил 1,9 ПДК (водохранилища Вилейское и Криница), азота аммонийного – 1,4 ПДК (Вилейское водохранилище).

Для определения подверженности водоема эвтрофированию недостаточно ограничиться только рыбохозяйственным критерием, а следует использовать также экологический критерий, устанавливающий пороговые значения, при соблюдении которых процесс эвтрофирования не получает развития. Численные значения концентраций в воде биогенных веществ в данном случае являются более низкими. Кроме того, в состав экологических показателей помимо биогенных веществ входит также уровень кислотности (рН), перманганатная окисляемость, цветность воды, взвешенные вещества.

Выполнено сопоставление допустимых величин экологических показателей с численными значениями концентрации указанных веществ в исследуемых водохранилищах. Определено превышения экологических норм для всех водохранилищ по нитритам и нитратам. По нитритам значение выше нормы в 3,2 раза фиксируется для Вилейского водохранилища, в 2,8 раза – для Заславского, в 2,2 раза – для Криница, в 2,6 раза – для водохранилища Дрозды. По нитратам – в 4,8 раза для Вилейского водохранилища, в 1,6 раза – для Заславского, в 1,9 раза – для водохранилищ Криница и Дрозды (рис. 7).

По фосфору фосфатов превышение в 1,2 раза наблюдается для Заславского водохранилища. Показатель цветности превышен в воде Вилейского водохранилища в 3,5 раза. Превышения по показателю перманганатной окисляемости в 1,2 раза отмечается также для водохранилищ Вилейское, Заславское и Криница. Значения показателей уровня кислотности и концентрации взвешенных веществ близки к экологическим нормативам.

Приведенные превышения экологических норм концентрации в водах всех рассматриваемых водохранилищ биогенных и иных значимых для эвтрофирования веществ свидетельствуют об их подверженности данному явлению, что периодически приводит к «цветению» воды. Выполненные натурные наблюдения показали, что оно отмечалось повсеместно во второй половине июля примерно в 60 % случаев.

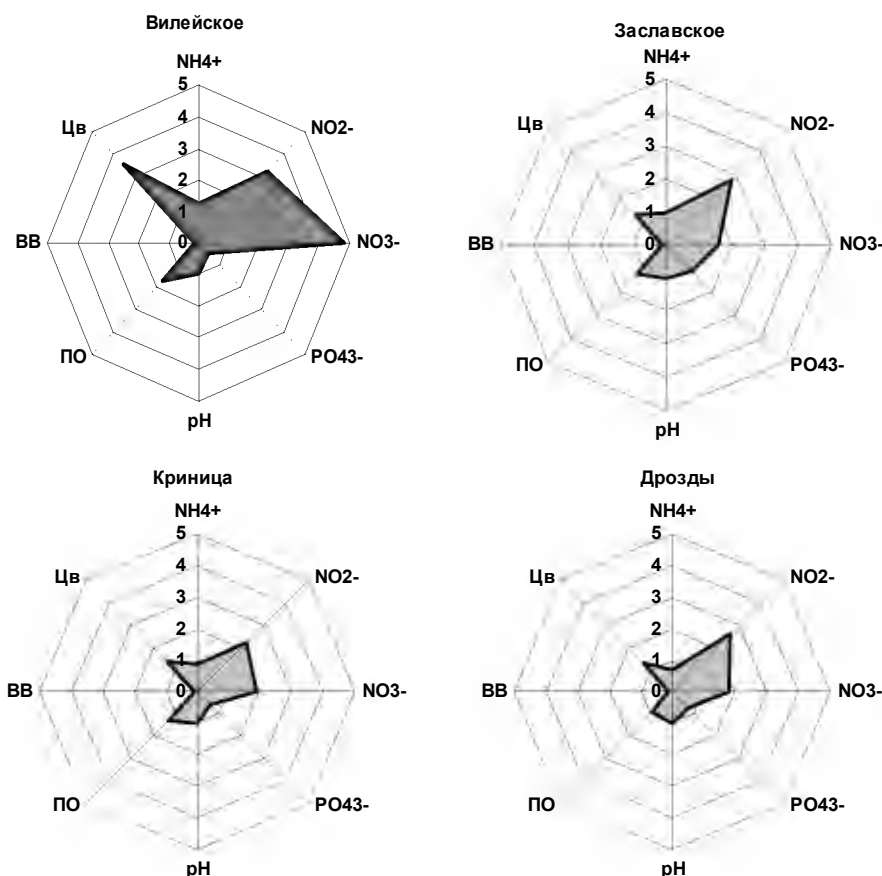


Рис. 7. Превышение экологических норм концентрации биогенных веществ в воде водохранилищ ВМБС: Цв – цветность; ВВ – взвешенные вещества; ПО – перманганатная окисляемость

Fig. 7. Exceeding environmental standards for the concentration of nutrients in the water of reservoirs VMWS: Tsv – color; SS – suspended solids; PO – permanganate oxidation

Водоохранные меры. С учетом подверженности водоемов ВМБС антропогенному эвтрофированию, основное направление водоохраных мер для них следует ориентировать на снижение поступления в эти водоемы биогенных веществ с водосборов. Содержание данных мер должно включать:

1) разработку и реализацию целевых бассейновых планов управления водными ресурсами рассматриваемых водохранилищ, что создаст предпосылки для системного решения проблемы их загрязнения;

2) применение почвозащитных технологий обработки сельскохозяйственных земель, обеспечивающих уменьшение почвенной эрозии и создание барьеров в ложбинах стока для предотвращения попадания продуктов эрозии в водотоки и водоемы (наиболее значимо для Заславского водохранилища и бассейна р. Или);

3) улучшение технологий применения удобрений, вносимых на сельскохозяйственные земли для их максимально полного усвоения растениями и минимизации поверхностного смыва и поступления в грунтовые воды;

4) установление водоохраных зон для водохранилищ и рек, на которых они построены и соблюдение режимов их использования;

5) обеспечение должного санитарного состояния населенных пунктов, расположенных в водоохраных зонах водохранилищ и рек, на которых они построены, с целью предотвращения смыва с их территории загрязняющих веществ, уделяя особое внимание поселениям, где размещены животноводческие фермы:

– в бассейне водохранилищ Заславское, Криница, Дрозды – поселений Аронова Слобода, Векшицы, Вишневка, Дехновка, Захаричи, Ляховщина, Малые Гаяны, Мацки, Семково, Соломоречье;

– в бассейне Вилейского водохранилища – поселений Волоки, Дубровка, Калачи, Козлевщина, Козлы, Пухляки, Совденевичи, Соколовка, Щербины, Якубовичи.

Выводы.

1. По сочетанию внутренних и внешних факторов формирования качества вод пригородных водохранилищ Вилейско-Минской водной системы, связанных с их гидрологическими параметрами и экологическим состоянием водосборных бассейнов, более благоприятными предпосылками обладает Вилейское водохранилище, благодаря большому объему водной массы и высокой лесистости водосбора.

2. Основным источником загрязнения водоемов выступает сельское хозяйство, влияние которого усиливается для водохранилищ Заславское, Криница, Дрозды за счет высокой эрозионной опасности их водосборных бассейнов, занятых преимущественно возвышенными ландшафтами.

3. В вещественном составе загрязняющих веществ превышения ПДК имеют место по азоту аммонийному, азоту нитритному и фосфору фосфатов; более высокой повторяемостью биогенного загрязнения (34–37 % случаев) выделяются крупные водохранилища – Заславское и Вилейское, по сравнению с малыми – Криница и Дрозды (каждое по 22 % случаев).

4. Уровни концентрации веществ, вызывающих антропогенное эвтрофирование водоемов повсеместно выше санитарных норм, что способствует его развитию и ухудшению качества вод.

5. Для снижения биогенного загрязнения водоемов приоритетное значение имеют водоохранные меры по предотвращению почвенной эрозии, внедрению экологически оптимальных технологий применения удобрений в сельском хозяйстве, созданию защитных барьеров на путях миграции загрязняющих веществ, соблюдению режимов водоохраных зон.

Список использованных источников

1. Струк, М. И. Бассейновый критерий организации природного каркаса пригородной территории (на примере Минска) / М. И. Струк, С. Г. Живнач // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 62–72.
2. Широков, В. М. Вилейское водохранилище / В. М. Широков, П. С. Лопух. – Минск : Университетское, 1989. – 80 с.
3. Логинова, Е. В. Эколого-географическая оценка состояния поверхностных вод Минской городской агломерации : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.11 / Е. В. Логинова. – Минск, 1999. – 21 с.
4. Струк, М. И. Оценка химического загрязнения пригородных водоемов Вилейско-Минской водной системы / М. И. Струк, О. В. Кадацкая // Прикладная лимнология : сб. науч. ст. / БГУ ; под общ. ред. П. С. Лопуха. – Минск : БГУ, 2000. – Вып. 2. – С. 128–134.
5. 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.
6. 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.
7. Принципы и опыт построения экологической классификации качества поверхностных вод суши / В. Н. Жукинский [и др.] // Гидробиологический журнал. – 1981. – Т. 17. – С. 38–49.
8. Водные объекты Республики Беларусь [Электронный ресурс] : справочник / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, РУП ЦНИИКИВР. – Минск, 2010. – Режим доступа: http://www.cricuwr.by/static/INVENT_VO/FrontPage.htm. – Дата доступа: 25.03.2023.
9. О некоторых вопросах нормирования качества воды рыбохозяйственных водных объектов : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь и Министерства здравоохранения Респ. Беларусь, 8 мая 2007 г., № 42/43. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W20716491>. – Дата доступа: 25.03.2023.
10. Блакітны скарб Беларусі. Рэкі, азёры, вадасховішчы, турысцкі патэнцыял водных аб'ектаў. – Мінск : Беларуская энцыклапедыя, 2007. – 477 с.
11. Энциклопедия природы Беларуси. – Минск : Беларуская Савецкая энцыклапедыя імя Петруся Броўкі, 1983. – 574 с.
12. Михневич, Э. И. Роль водообмена в улучшении экологического состояния водохранилищ водной системы г. Минска / Э. И. Михневич // Материалы III Международного водного форума, 2–3 октября. – Минск, 2008. – С. 279–280.
13. Вилейско-Минская водная система [Электронный ресурс] / УП «Минскводоканал». – Минск, 2023. – Режим доступа: <https://minskvodokanal.by/about/activities/vileika-minsk-water-system/>. – Дата доступа: 25.09.2023.
14. Авакян, А. Б. Водохранилища / А. Б. Авакян, В. П. Салтанкин, В. А. Шарапов. – М. : Мысль, 1987. – 323 с.
15. Лопух, П. С. Гидрология водохранилищ / П. С. Лопух. – Минск, 2013. – 342 с.
16. Охрана природы. Гидросфера. Классификация водных объектов [Электронный ресурс] : ГОСТ 17.1.1.02-77 : утв. и введ. постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР, 4 февр. 1977 г., № 299. – Режим доступа: <https://rotest.info/gost/001.013.060/gost-17.1.1.02-77/>. – Дата доступа: 25.03.2023.
17. Типовые правила эксплуатации водохранилищ [Электронный ресурс] : РД 33-32-08-87 : утв. приказом Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР, 6 апр. 1987 г., № 141. – Введ. 01.10.1987. – Режим доступа: <https://library-full.nadzor-info.ru/doc/10766/>. – Дата доступа: 25.03.2023.
18. Власов, Б. П. Антропогенная трансформация озер Беларуси: геоэкологическое состояние, изменения и прогноз / Б. П. Власов. – Минск, 2004. – 207 с.

References

1. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Bassejnovyj kriterij organizacii prirodnogo karkasa prigorodnoj territorii (na primere Minska)* [Basin criterion for organization of the natural frame of a suburban area (on the example of Minsk)]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 62–72. (in Russian)
2. Shirokov V. M., Lopuh P. S. *Vilejskoe vodohranilishche* [Vileyskoye reservoir]. Minsk, 1989, 80 p. (in Russian)
3. Loginova E. V. *Ekologo-geograficheskaya ocenka sostoyaniya poverhnostnykh vod Minskoj gorodskoj aglomeracii : avtoref. dis. kand. geogr. nauk* [Ecological-geographical assessment of the state of surface waters in the Minsk urban agglomeration. Dr. biol. sci. diss.]. Minsk, 1999, 21 p. (in Russian)
4. Struk M. I., Kadackaya O. V. *Ocenka himicheskogo zagriazneniya prigorodnykh vodoemov Vilejsko-Minskoj vodnoj sistemy* [Assessment of chemical pollution of suburban water bodies of the Vileysko-Minskaya water system]. *Prikladnaya limnologiya = Applied Limnology*. Minsk, 2000, pp. 128–134. (in Russian)
5. Struk M. I., Zhivnach S. G., Bokaya G. M. *Geoekologicheskaya ocenka prigorodnykh vodohranilishch Minska* [Geoecological assessment of suburban reservoirs of Minsk]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2013, issue 23, pp. 115–124. (in Russian)
6. 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, issue 19, no. 2, pp. 59–67. (in Russian)
7. 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)
8. *Vodnye ob'yekty Respubliki Belarus : spravochnik*. [Water bodies of the Republic of Belarus]. *Ministerstvo prirodnih resursov i okhrany okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus. RUP CNIKIVR* [Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus. RUE 'Central Research Institute for the Integrated Use of Water Resources']. Available at: http://www.cricuwr.by/static/INVENT_VO/FrontPage.htm (accessed 25 March 2023) (in Russian)
9. *O nekotorykh voprosakh normirovaniya kachestva vody rybohozyajstvennykh vodnykh objektov* [On some issues of standardizing the water quality of fishery water bodies]. *Postanovlenie Ministerstva prirodnih resursov i okhrany okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus i Ministerstva zdorovoohraneniya Respubliki Belarus, 8 Maya 2007, № 42/43* [Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus and the Ministry of Health of the Republic of Belarus, 8 May 2007, no. 42/43]. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W20716491> (accessed 25 March 2023) (in Russian)
10. *Blakitny skarb Belarusi. Reki, azyory, vadaskhovishchy, turytski patencyyal vodnykh ab'ektau* [Blue treasure of Belarus. Rivers, lakes, reservoirs, tourist potential of water objects]. Minsk, 2007, 477 p. (in Belarusian)
11. *Encyklopedyya pryrody Belarusi* [Encyclopedia of nature of Belarus]. Minsk, 1983, 574 p. (in Belarusian)
12. Mihnevich E. I. *Rol' vodoobmena v uluchshenii ekologicheskogo sostoyaniya vodohranilishch vodnoj sistemy g. Minska* [The role of water exchange in improving the ecological condition of reservoirs in the Minsk water system]. Minsk, 2008, pp. 279–280. (in Russian)
13. *Vilejsko-Minskaya vodnaya sistema* [Vileysko-Minskaya water system]. *UP "Minskvodokanal"*. Available at: <https://minskvodokanal.by/about/activities/vileysko-minsk-water-system/> (accessed 25 September 2023) (in Russian)
14. Avakyan A. B., Saltankin V. P., Shrapov V. A. *Vodohranilishcha* [Reservoirs]. Moscow, 1987, 323 p. (in Russian)
15. Lopuh P. S. *Gidrologiya vodohranilishch* [Hydrology of reservoirs]. Minsk, 2013, 342 p. (in Russian)
16. *GOST 17.1.1.02-77. Ohrana prirody. Gidrosfera. Klassifikatsiya vodnykh ob'ektov* [State Standard 17.1.1.02-77. Protection of Nature. Hydrosphere. Classification of water bodies]. Utv. i vved. Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta standartov Soveta Ministrov SSSR, 4 fevr. 1977 g., № 299 [Approved and introduced. Resolution of the State Standards Committee of the Council of Ministers of the USSR, 4 February 1977, no. 299]. Available at: <https://rotest.info/gost/001.013.060/gost-17.1.1.02-77/> (accessed 25 March 2023) (in Russian)
17. *RD 33-32-08-87. Tipovye pravila ekspluatatsii vodohranilishch* [RD 33-32-08-87. Standard rules for the operation of reservoirs]. Utv. prikazom Ministerstva melioratsii i vodnogo hozyajstva SSSR, 6 Apr. 1987 g., № 141 [Approved by Order of the Ministry of Land Reclamation and Water Resources of the USSR, 6 April 1987, no. 141]. (in Russian)
18. Vlasov B. P. *Antropogennaya transformatsiya ozer Belarusi: geoekologicheskoe sostoyanie, izmeneniya i prognoz* [Anthropogenic transformation of lakes in Belarus: geoecological condition, changes and forecast]. Minsk, 2004, 207 p. (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 – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: zhyunach@gmail.com

Information about the authors

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

Svetlana G. Zhivnach – 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

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-67-83>
УДК 581.526.32(476)

Поступила в редакцию 21.10.2023
Received 21.10.2023

ДИНАМИКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В АЦИДОТРОФНЫХ ОЗЕРАХ БЕЛАРУСИ

Н. Ю. Суховило, Д. Б. Власова, А. А. Новик, Б. П. Власов

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. На примере восьми ацидотрофных озер Беларуси проведен анализ динамики степени их зарастания и видового состава макрофитов. Актуальность исследования заключается в том, что ацидотрофные озера, являющиеся местами произрастания охраняемых видов растений, наиболее чувствительны к изменению природной среды и антропогенной нагрузке, поэтому их изучение перспективно для выявления изменений, происходящих на водосборах, и принятия мер, направленных на охрану озерных экосистем.

Наиболее выраженные изменения в характере зарастания наблюдаются в озерах Свитязь и Белое (Лунинецкий район), испытывающих высокую рекреационную нагрузку, а также Большое Островито. За 30 лет в оз. Свитязь глубина распространения погруженных макрофитов сократилась с 7 до 2 м, а обилие и проективное покрытие полупогруженных макрофитов возросло. В оз. Белое почти полностью исчез полушник озерный (*Isoëtes lacustris* L.), формировавший ярус погруженных растений, и образовалась ранее отсутствовавшая полоса воздушно-водных растений. Общая площадь зарастания озера сократилась с 35,0 % площади акватории до 3,2 %. В оз. Большое Островито практически исчез водяной мох, ранее распространенный на глубинах до 3–5 м.

В других изученных озерах изменение площади зарастания выражено меньше. Основные причины деградации макрофитов – увеличение антропогенной нагрузки и изменение гидрологического режима.

Ключевые слова: ацидотрофное озеро; Беларусь; макрофиты; схема зарастания озера; антропогенное воздействие.

Для цитирования. Суховило Н. Ю., Власова Д. Б., Новик А. А., Власов Б. П. Динамика распространения водной растительности в ацидотрофных озерах Беларуси // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 67–83.

DYNAMICS OF AQUATIC VEGETATION DISTRIBUTION IN ACIDOTROPHIC LAKES OF BELARUS

N. Yu. Sukhovilo, D. B. Vlasova, A. A. Novik, B. P. Vlasov

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. We analyzed the dynamics of overgrowth and the species composition of macrophytes in eight acidotrophic Belarusian lakes. The relevance of the study lies in the fact that acidotrophic lakes, which are places where protected plant species grow, are most sensitive to changes in the environment and anthropogenic load. Therefore, their study allows us to identify changes occurring in watersheds and take measures aimed at protecting lake ecosystems.

The most pronounced changes in the nature of overgrowth are observed in lakes Svityaz and Beloe (Luninets district), which experience high recreational pressure, as well as Bolshoe Ostrovito. For 30 years in Lake Svityaz, the depth of distribution of submerged macrophytes decreased from 7 to 2 m, and the abundance and projective cover of semi-submerged macrophytes increased. In Lake Beloe *Isoëtes lacustris* L. disappeared almost completely. 20 years ago, it formed a solid layer of submerged plants. Previously absent strip of aerial-aquatic plants formed. The total area of overgrowth of the lake decreased from 35.0 % of lake area to 3.2 %. In Lake Bolshoe Ostrovito water moss has almost disappeared. Previously it distributed at depths of 3–5 m.

In other studied lakes, the change in the area of overgrowth is less pronounced. The main reasons for the degradation of macrophytes are an increase in anthropogenic load and changes in the hydrological regime.

Keywords: acidotrophic lake; Belarus; macrophytes; lake overgrowth scheme; anthropogenic impact.

For citation. Sukhovilo N. Yu., Vlasova D. B., Novik A. A., Vlasov B. P. Dynamics of aquatic vegetation distribution in acidotrophic lakes of Belarus. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 67–83.

Введение. Среди огромного многообразия озер Беларуси выделяется группа из 22 уникальных водоемов, которые служат местами произрастания реликтовых видов водных растений – полушника озерного (*Isoëtes lacustris* L.) и лобелии Дортмана (*Lobelia dortmanna* L.). Наиболее ранние исследования кислототрофных озер как мест произрастания *Isoëtes lacustris*, *Lobelia Dortmanna*, и *Littorella lacustris*, относятся к началу прошлого века и затрагивают в основном флористическую характеристику и характер распространения высшей водной растительности в оз. Свитязь [1].

До 1970-х годов в Беларуси достоверно было известны четыре места произрастания полушника озерного [2]. Начиная с 1973 г. в Белгосуниверситете проводилось комплексное исследование озер, в программу которого входило изучение водной растительности. В результате широкомасштабного обследования в 1976–1977 гг. в Белорусском Поозерье выявлено еще семь мест произрастания *Isoëtes lacustris* L., дана детальная морфологическая, гидрологическая, гидрохимическая, гидробиологическая характеристика озер, служащих местами произрастания вида [3].

Информация о результатах флористических исследований уникальных озер и новых местах произрастания видов регулярно обновляется, что отражено в публикациях Г. С. Гигевич, Д. В. Дубовик, Г. В. Вынаева, И. И. Шимко [4–6].

Специалистами-ботаниками Витебского госуниверситета продолжены флористические исследования озер, служащих местами произрастания реликтовых охраняемых видов полушника озерного и лобелии Дортмана [7]. Ими были выполнены детальное обследование видового состава, особенностей произрастания и физико-химических параметров среды озер Глубокое, Чербомысло, Бредно, проведено картографирование и определение продуктивности их водной растительности [8–10]. В оз. Бредно зарегистрировано семь видов макрофитов, которые образуют три полосы: воздушно-водных растений, растений с плавающими листьями и погруженных макрофитов. Оно является единственным в Витебской области известным местом произрастания лобелии Дортмана [8], где она произрастала в оптимальных условиях. В составе водной растительности оз. Глубокое было обнаружено всего семь видов макрофитов. Слабая зарастаемость озера в целом обусловлена узкой литоралью, низкими величинами минерализации и содержания биогенных элементов, кислой реакцией воды. Отличительной чертой водоема является то, что погруженные макрофиты были представлены лишь двумя видами: полушником озерным и мхом (*Drepanocladus Sendtneri* (Schimp.)), и приурочены исключительно к наиболее развитому участку литорали у северного берега. Фитоценоз полушника озерного протяженностью 140 м и шириной 30 м простирался на пологой литорали северного плёса на глубинах от 0,7 до 4,0 м. Расчеты показали, что макрофиты в оз. Глубокое занимали площадь 0,75 га, что составляет 1,8 % площади всего зеркала озера [9]. Видовое разнообразие, биомасса и продуктивность высшей водной растительности в оз. Чербомысло 25 лет назад были значительно более высокими, чем в других кислототрофных озерах. В озере отмечено 15 видов макрофитов. Для озера характерен фрагментарно-поясной тип зарастания. Полосу прибрежных воздушно-водных растений формировали тростник обыкновенный, рогоз узколистный *Typha angustifolia* L., осока высокая *Carex elata* All., хвощ приречный *Equisetum fluviatile* L. и аир болотный *Acorus calamus* L. Погруженные макрофиты в оз. Чербомысло были представлены полушником озерным, который сплошным ковром шириной около 20,0 м опоясывал все озеро и заходил на глубину до 3,5 м. В западной части озера полушник в массе отмечался в литорали, начиная с глубины 40,0 см. Обилие его колебалось от 3 на периферии и до 6 баллов – к центру озера [10].

Регулярные полевые обследования и систематизация накопленного материала позволили выявить основные закономерности и характер распространения, особенности произрастания, взаимосвязь с условиями среды произрастания и проблемы охраны популяций *Isoëtes lacustris* L., а также разработать рекомендации по их охране. Разработанные рекомендации включают в себя характеристику объекта охраны, результаты инвентаризации (паспортизация, распространение) местонахождений, ревизию, общие природоохранные мероприятия по сохранению вида, программу мониторинга состояния популяций, протокол генетического мониторинга популяций, перечень рекомендаций по оптимизации условий произрастания, по снятию/снижению внешних антропогенных угроз и др. [11].

Позже на примере 19 уникальных озер Беларуси, для которых находки видов *Isoëtes lacustris* L. и *Lobelia dortmanna* L. достоверно подтверждены гербарными образцами, определены характер распространения исчезающих реликтовых видов в уникальных озерах Беларуси и установлена зависимость состояния популяций от параметров среды произрастания. Анализ опирается на данные многолетних натурных наблюдений. Исследованы морфометрические, физико-химические параметры озер, видовой состав растений, площадь и глубина произрастания, биомасса, ярусность, встречаемость, обилие и частное проективное покрытие видов. Анализ показал существование обратной зависимости развития видов и следующих параметров среды: активной реакции воды (pH), концентрации общего фосфора, азота нитритного, перманганатной и бихроматной окисляемости, на основании которого были выделены две группы озер. Оптимальные ценотические и экологические условия характерны для

ацидотрофных озер с песчаными водосборами, покрытыми лесом и верховыми болотами, низкими показателями минерализации воды, кислотности, цветности, содержания биогенных элементов и с высокой прозрачностью воды. В таких озерах формируются продуктивные заросли и «подводные луга». В результате исследования определены угрозы существованию исчезающих видов и предложены меры по организации мониторинга и созданию природных резерватов для сохранения видов [12].

В последние годы стало активно развиваться новое направление в исследованиях – изучение генетического разнообразия и структуры популяций *Isoëtes lacustris*, приуроченного к олиготрофным озерам, распространение которых в Европе резко сокращается. Выяснено, что снижение уровня генетического разнообразия в небольших изолированных популяциях в сочетании с лимитирующими факторами (природными – южная граница распространения; антропогенными – эвтрофикация и изменение режима озера) представляют высокий риск для развития популяций и распространения вид в Беларуси. На основе комплексного анализа эколого-фитоценологических характеристик ареала, уровня и структуры генетической изменчивости его популяций предложены меры по сохранению видов *in situ* и *ex situ* [13].

Изучение реликтовых видов аквафлоры *Isoëtes lacustris* L. и *Lobelia dortmanna* L., встречающихся в уникальных озерах сопредельных стран Восточной Европы, Прибалтики, Украины и России, посвящено в основном геоботаническим исследованиям и направлено на исследование распространения, характеристику среды произрастания и каталогизацию видов. Наибольшее количество уникальных полуживых озер сосредоточено в северо-западных областях России и в Карелии, однако детальных исследований о распространении и условий произрастания редких и охраняемых видов недостаточно [14, 15].

Анализ структуры озерных фитоценозов зоны краевых оледенений северо-запада Европейской России, которые представляют собой флоры-изоляты, был проведен сотрудниками Института биологии внутренних вод имени И. Д. Папанина Российской академии наук. Он показал, что межпопуляционный обмен генетическим материалом в озерах очень затруднен, так как эти водоемы зачастую расположены на высоких гипсометрических уровнях относительно остальной гидросети, поэтому имеют особый гидрологический и гидрохимический режимы, сдвинутые в сторону олиготрофии. Этим объясняется нахождение в составе гидрофитобиоты олигомезотрофных популяций *Isoëtes lacustris* и *Lobelia dortmanna*, экогенетически связанных с чистыми олиготрофными водами [16].

Исследование водной растительности озер Северной Европы, испытывающих антропогенную нагрузку в результате использования в гидроэнергетике, позволило определить важные факторы, вызывающие ухудшение экологического состояния озер. Колебания уровня воды вызывают эрозию береговой линии и, в зависимости от диапазона колебаний, влияют на видовой состав или исчезновение чувствительных макрофитов. С использованием данных о макрофитах 73 озер Финляндии, Норвегии и Швеции с различными колебаниями уровней воды были рассчитаны амплитуды колебаний уровней, при которых начинается деградация макрофитов и получены индексы понижения уровня воды. Для полуживых озерного зимняя сработка не должна превышать 3 м [17]. На естественных водоемах Беларуси соизмеримые амплитуды колебаний уровней воды не происходят, а для ацидотрофных озер в многолетнем разрезе не превышают 50–60 см.

В ходе четырехлетнего эксперимента по изменениям в прорастании микро- и макроспор *Isoëtes lacustris* в лаборатории и в естественных условиях *in situ* на оз. Черное в Чехии были зарегистрированы различия в прорастании спор при различных температурах воды. Прорастание как микро-, так и макроспор постепенно увеличивалось в течение четырех сезонов. Минимальная температура, необходимая для прорастания, была ниже для микроспор (6 °C), чем для макроспор (12 °C). Длительное прорастание и развитие зародыша может ограничить размножение *Isoëtes lacustris*, сделав его чувствительным как к эпизодическим, так и к постоянным изменениям в среде обитания. Средняя продолжительность времени, когда температура (12 °C) была достаточно высокой для прорастания, составила 119 дней и наблюдалась в период с июня по сентябрь [18].

Значительные успехи в исследовании лобелиевых озер достигнуты в Польше. Лобелиевые озера расположены главным образом в северной части страны. В середине XX в. в Польше насчитывалось более 190 озер с лобелией. Их относят к так называемым озерам с мягкой водой из-за низкого содержания кальция и магния. Их воды слабо забуферены, обычно имеют кислую реакцию, а также небольшое количество биогенных элементов. Озера зарастают специфическими видами растений – изоэтидами, приспособленными к бедной среде обитания: *Lobelia dortmanna*, *Isöetes lacustris*, *Littorella uniflora* и рядом других сопутствующих видов. Увеличение скорости эвтрофирования озер является наиболее распространенным и серьезным антропогенным нарушением, происходящим в водных геоэкосистемах. Лобелиевые озера – одни из самых ценных водоемов, особенно подвержены такому давлению. В статье описано трофическое состояние 13 лобелиевых озер, расположенных в северо-восточной части Кашубского Поозерья. Оценка показала, что шесть из этих озер находились на границе мезотрофно-эвтрофное состояние, а семь представляли собой значительно развитое эвтрофное состояние [19].

Обзор данных за последние 50 лет изучения олиготрофных озер и озер с признаками дистрофии Эстонии, являющихся основными местами обитания редких макрофитов, особенно изоегид, позволил выявить основные причины в динамике развития макрофитов. Антропогенное воздействие на эти озера в Эстонии началось с вымачивания льна и потребления воды, продолжается строительством саун, обогащение сельскохозяйственными питательными веществами. Антропогенное закисление озер Эстонии не выявлено, но наблюдается естественная дистрофирование из-за притока гуминовых соединений. Эвтрофикация увеличивает заселение мелководной зоны поясами не характерной растительности, подавление изоегид элодеидами и затемнение цветением фитопланктона на более глубоких участках. Быстрорастущие эвтрофенты ускоряют накопление органических осадков, неблагоприятных для изоегид. Среди растений с плавающими листьями происходит гибридизация между редкими и обычными видами. Делается вывод, что практически невозможно восстановить экосистемы, которые формировались и балансировались на протяжении тысячелетий и потеряли свои свойства за гораздо более короткий период [20].

Лимнологические исследования на 13 лобелиевых озёрах Польши, имеющих уникальную ценность не только в масштабах страны, подвергаются деградации из-за увеличения антропогенного давления. Полученные результаты показывают, что только одно из озер, вероятно, сохранит низкий трофический уровень. Четыре озера представляют собой геоэкосистемы с умеренным уровнем естественной эвтрофикации. Остальным из изученных лобелиевых озер грозит быстрая эвтрофикация воды, о чем свидетельствуют высокая уязвимость водосбора к активизации рассеянной биогенной нагрузки и низкая устойчивость озер к внешнему воздействию [21].

Изученные мягководные озера с изотидами являются экосистемами, склонными к деградации из-за низкой буферной емкости их вод. Одной из главных угроз является эвтрофикация из-за использования водосбора в сельском хозяйстве, урбанизации и рекреационной привлекательности. В этой статье рассмотрены изменения в составе воды и трансформация биоценозов за последние 30 лет одного из крупнейших польских озер – оз. Елен. С начала 1990-х годов наблюдается постепенное увеличение трофности озера, на что указывают увеличение доступности питательных веществ, ухудшение кислородного режима и уменьшение прозрачности воды. Изменения химического состава воды вызывают биологические трансформации, в частности увеличение численности фитопланктона, а также постепенное сокращение площади фитолиторали, уменьшение частоты встречаемости *Lobelia dortmanna* и *Isoetes lacustris*, а также появление видов растений, характерных для эвтрофных озер [22, 23].

В статье М. Vöge о мониторинге жизнеспособности полушника озера автор излагает результаты неинвазивного контроля *Isoetes Lacustris*, проведенного в период с 1995 по 2014 г. более чем в 100 озерах по всей Европе. Характеризовались связь электропроводности, кислотности, прозрачности воды по диску Секки с распространением указанных видов подводных растений и их продуктивностью. Инвентаризация сопутствующих видов растений отражает меняющуюся окружающую среду. Высокие значения корреляции между средним и наименьшим числом листьев споросных растений позволяет отделение молодых растений от взрослых. Наконец, полученные результаты показывают связь между гидрохимическими параметрами, уровнем жизнеспособности и структурой флоры [24].

Как видно из проведенных ранее исследований, растительность ацидотрофных озер достаточно динамична, поэтому актуализация сведений о ее распространении видится перспективным направлением.

Цель работы – провести анализ динамики зарастания ацидотрофных озер Беларуси в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия на их водосборы.

Материалы и методы. Исходными данными для проведения исследований послужили результаты натурных наблюдений, фондовые материалы научно-исследовательской лаборатории озерадения Белгосуниверситета за период с 1971 по 2014 г., включающие морфометрические, гидрохимические параметры, характеристики водосборов и водообмена, результаты изучения видового состава и распространения водной растительности [25–27], а также собственные полевые исследования авторов, выполненные в 2022–2023 гг. Основными методами исследования были полевой, лабораторный, системного анализа, сравнительно- и эколого-географический, анализ данных дистанционного зондирования Земли, картографический.

Термин «ацидотрофные озера» был впервые введен А. Тинеманом в 1928 г. Под этим термином подразумевались низкопродуктивные озера со значениями водородного показателя ниже 5,5. Шинкичи Йошимура (1933 г.) разделил ацидотрофные озера на два типа: в первом кислая реакция среды обусловлена особенностями подстилающих пород, во втором – биологическими процессами. К данной типизации позднее добавили тип озер, закисление которых обусловлено выпадением кислотных дождей, т. е. имеет антропогенные причины [28]. Рассматриваемые в рамках данного исследования озера относятся ко второму подтипу, однако водородный показатель ниже 5,5 в них наблюдается, в основном, в зимний период (кроме озер Глубокое и Ильгиния). Из общего количества известных ацидотрофных

озер обследовано восемь водоемов, имеющих типичные признаки и отнесенных к модельным. Они различаются по морфометрии, генезису котловин, химическому составу воды, биогенным нагрузкам, поэтому достаточно полно отражают природные особенности acidотрофных озер Беларуси. Географическое положение объектов исследования отражено на рис. 1.



Рис. 1. Картосхема расположения объектов исследования

Fig. 1. Map of the location of research object

Большинство исследуемых озер приурочено к Полоцкой озерно-ледниковой низине: оз. Свитязь расположено на Новогрудской конечно-моренной возвышенности, оз. Ильгиния – в пределах Свенцянских конечно-моренных гряд, оз. Белое (Лунинецкий район) – на Логишинской водно-ледниковой равнине.

Водоемы имеют ледниковое, реже – карстовое (озера Свитязь и Белое, Лунинецкий район) происхождение, относятся к числу неглубоких и небольших по площади водоемов. Котловины, как правило, имеют простое строение: округлую или овальную форму, плавную береговую линию, воронкообразное строение подводной части. Исключением являются озера Глубокое и Белое (Полоцкий район), отличающиеся изрезанной береговой линией и сложным рельефом дна. Литораль водоемов узкая, пологая, занимает 10–20 % площади акваторий, сложена песками и песками заиленными, в оз. Ильгиния – высокоорганическими сапропелями. Сублиторальный склон неширокий, крутой, сложен илом опесчаненным. Ложе озер Бредно, Большое Островито, Чербомысло можно охарактеризовать как плоское, у озер Свитязь, Ильгиния, Белое (Лунинецкий район) – воронкообразное, у озер Глубокое и Белое (Полоцкий район) – сложное, с чередованием поднятий и ям. Берега acidотрофных озер Поозерья чаще всего крутые, сложенные песком, покрытые лесной или луговой растительностью. На участках, примыкающих к болотам, берега сложены торфом, зарастают водно-болотной растительностью. Поймы не выражены. Склоны котловин имеют высоту 1–20 м, на отдельных участках крутые, но чаще пологие, сложены песками, преимущественно покрыты лесом. Водосборы озер имеют малую площадь – от 0,25 км² (Ильгиния) до 9,04 км² (Свитязь). Рельеф преимущественно крупнохолмистый, пологоволнистый, склоны чаще сложены песками, покрыты сосновым лесом. На водосборах почти всех озер имеются небольшие массивы верховых болот, примыкающие к акватории. Гидрологическая сеть на водосборах озер не развита, практически все озера не имеют впадающих водотоков. Лишь в оз. Глубокое на западе впадает небольшой ручей из оз. Пустое.

Уровенный режим озер отличается стабильностью. За многолетний период по данным визуальных наблюдений отмечаются небольшие колебания уровней воды в годовом цикле.

В водном балансе преобладает приток грунтовых вод и осадки на зеркало озера, которые доминируют в приходной части водного баланса. В расходной части доминирует испарение с поверхности озер. Из оз. Свитязь вытекает р. Своротва, сток из оз. Чербомысло был перекрыт при неправильной установке дренажной трубы, поэтому в настоящее время сток из озера отсутствует. Остальные озера

являются бессточными. Водообмен озер замедленный. Основные морфометрические характеристики и параметры водообмена исследуемых озер приведены в табл. 1.

Таблица 1. Морфометрические характеристики исследуемых озер [27]

Table 1. Morphometric characteristics of studied lakes [27]

Озеро	Район	Площадь, км ²	Объем, млн м ³	Глубина, м		Открытость	Глубинность	Площадь водосбора, км ²	Период водообмена, лет
				максимальная	средняя				
Белое	Лунинецкий	0,23	1,75	17,0	7,6	0,03	99,13	0,31	44,80
Белое	Полоцкий	1,00	8,42	19,6	8,4	0,12	8,40	1,80	21,05
Глубокое	Полоцкий	0,42	2,20	11,5	5,2	0,08	6,93	1,94	3,58
Большое Островито	Полоцкий	0,48	1,50	6,0	3,1	0,15	3,97	1,12	6,00
Ильгиния	Мядельский	0,08	0,43	15,6	5,1	0,02	179,89	0,25	8,07
Чербомысло	Полоцкий	0,50	1,67	6,9	3,3	0,15	4,18	2,02	3,71
Свитязь	Новогрудский	2,24	7,76	15,0	3,4	0,52	5,80	9,04	5,00
Бредно	Верхнедвинский	0,21	0,54	4,7	1,9	0,15	20,36	0,30	6,90

Гидрохимический режим озер формируется под влиянием характера питания (атмосферные осадки) гидрологических особенностей, состава приточных вод и морфометрического строения котловины. Незначительная площадь водосбора и отсутствие поверхностного притока способствуют стабильности химического состава водной массы в течение вегетационного сезона. Значительные глубины озер (за исключением озер Бредно, Чербомысло, Большое Островито) при малой площади способствуют установлению в теплое время года прямой температурной стратификации. Важным показателем, влияющим на глубину распространения макрофитов, является прозрачность воды. Благодаря низкой продуктивности, ацидотрофные озера обладают высокой прозрачностью. Однако в многолетнем разрезе в ряде озер она снижается. Наиболее ярко этот процесс проявляется в озерах Глубокое (с 9,5 до 5,3 м), Свитязь (с 7,0 до 2,7 м) и Бредно (с 4,6 до 2,0 м). Это свидетельствует об усилении процессов эвтрофирования.

Макрофитные съемки большинства озер впервые были выполнены в конце 1970-х годов при их паспортизации. Тогда же в них были обнаружены редкие виды водной флоры. В дальнейшем, при проведении наблюдений за водной растительностью в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды, а также выполнении работ по созданию и преобразованию особо охраняемых природных территорий, в состав которых входят исследованные водоемы, сведения о видовом составе и распространении макрофитов актуализировались. Макрофитные съемки производили по методике В. М. Катанской [29]. Построение картосхем зарастания озер ранее осуществляли в программе Corel Draw, в последние годы для этого применяли ArcMap 10.4 и данные дистанционного зондирования Земли (базовая карта ArcMap). В период полевых работ предварительно составленные картосхемы уточняли, а также наносили погруженные макрофиты. Глубину их произрастания определяли с помощью эхолотов Eagle Fish ID 128 и Lowrance Hook Reveal 7 Triple Shot, а их видовой состав – с помощью «кошки». В местах предполагаемого распространения охраняемых видов макрофитные съемки выполняли с использованием камеры для подводной видеосъемки Sititek и легководолазного снаряжения.

Результаты и их обсуждение. Наиболее ярко изменение площадей и характера зарастания выражено в озерах Свитязь и Белое (Лунинецкий район). В 2001 г. высшая водная растительность в оз. **Белое** была развита слабо и представлена двумя видами полностью погруженных гидрофитов и четырьмя видами азрогидрофитов (полупогруженных растений). Растения с плавающими листьями в озере отсутствовали. У самого уреза воды на отдельных участках вдоль западного берега встречались осока, стрелолист стрелолистный, частуха подорожниковая, аир обыкновенный. В литоральной зоне на глубинах от 0,2 до 0,7 м вдоль всего побережья озера произрастал редкий, охраняемый вид растений – лобелия Дортмана, образующая почти непрерывное кольцо шириной 2,0–3,5 м. Еще одним представителем погруженной растительности в озере являлся полушник озерный, который произрастал почти повсеместно на литорали с глубины 1,0 м и сублиторальном склоне до глубины 5,0 м. Оз. Белое зарастало на 35 %, как показано на рис. 2. В 2006 г. характер зарастания водоема существенно не изменился.

Обследование озера в 2011 г. показало, что степень и характер зарастания водоема высшей водной растительностью, по сравнению предыдущими обследованиями в 2001 и 2006 г., претерпели значительные изменения. Зарастало всего 15 % площади озера.

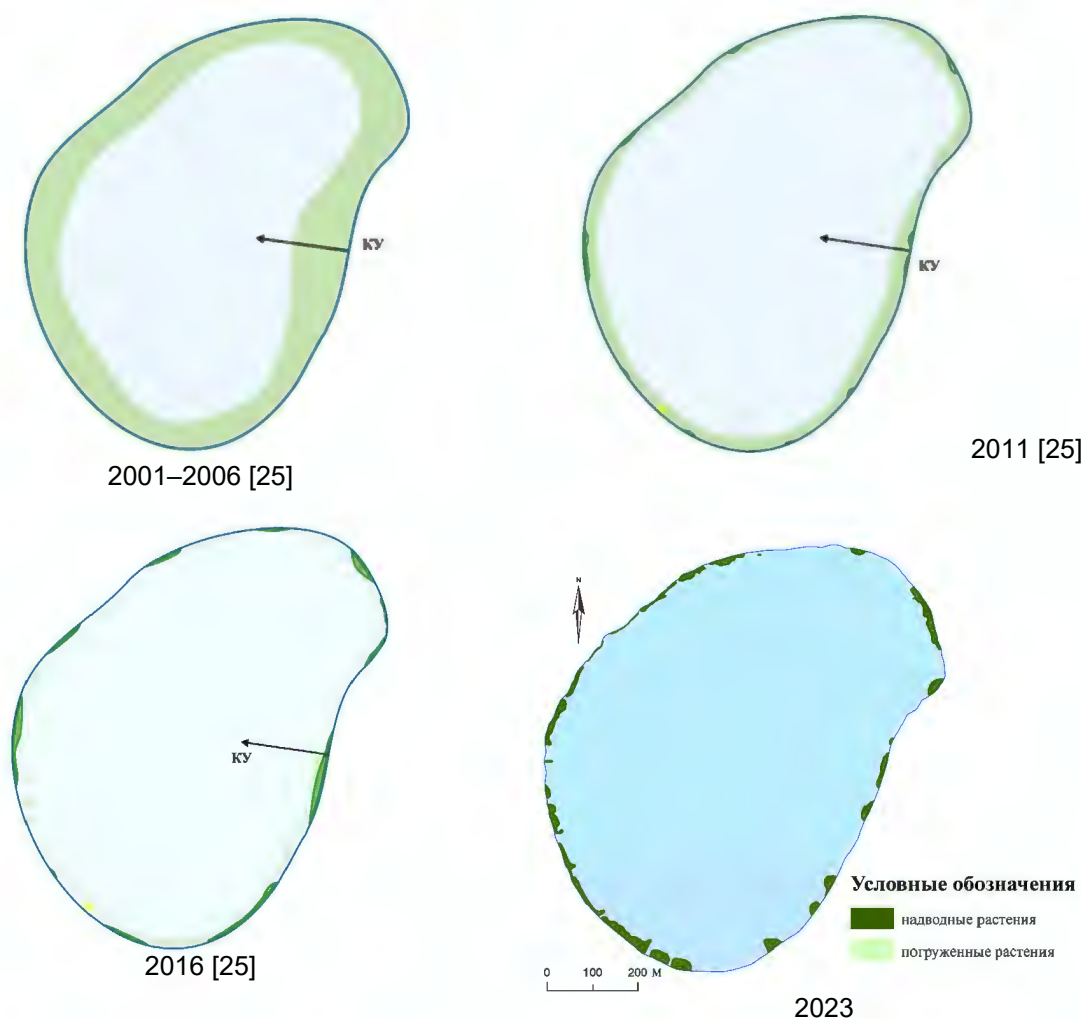


Рис. 2. Динамика площади и характера зарастания оз. Белое (Лунинецкий район), 2001–2023 гг.

Fig. 2. The dynamics of overgrowth area and nature in Lake Beloe (Luninets district), 2001–2023

Высшая водная растительность в озере была развита слабо и представлена двумя видами полностью погруженных гидрофитов и шестью видами аэрогидрофитов (полупогруженных растений). Растения с плавающими листьями были представлены одним видом – горцем земноводным. У самого уреза воды и до глубины 0,3–0,5 м на отдельных прибрежных участках встречались осока вздутая, тростник обыкновенный, рогоз узколистный, частуха подорожниковая, ситняг игольчатый (*Eleocharis acicularis* (L.) Roem. & Schult), аир болотный (*Acorus calamus* L.). В литоральной зоне на глубинах от 0,2 до 1,0 м вдоль всего побережья озера произрастала лобелия Дортмана, образующая почти непрерывное кольцо шириной 2,0–3,5 м. Полушник произрастал спорадически на глубинах 1,0–3,0 м. Единично встречался водяной мох [25].

Степень зарастания водоемов полушникового подтипа, к которым относится и оз. Белое, напрямую и тесно связана с прозрачностью, водородным показателем и минерализацией воды. Поэтому наблюдающиеся изменения в экосистеме озера можно связать с некоторым (хотя и незначительным) увеличением минерализации и кислотности. А появление в видовом составе и распространение тростника, рогоза и горца земноводного может указывать на тенденцию изменения типа зарастания озера с гидрофитного на гело-гидрофитный [4, 5].

К 2016 г. увеличились площади зарастания аэрогидрофитов (надводных растений). В начале 2000-х годов данная группа растений отмечалась единичными экземплярами или небольшими группами на глубинах от 0,0 до 0,5 м. Надводные растения были представлены четырьмя видами, среди которых доминировала осока вздутая. За 15 лет сформировался пояс аэрогидрофитов. Эти макрофиты прерывистой полосой, ширина зарастания которой составляла 2–15 м, были распространены по всему периметру озера. Они формируют, преимущественно, чистые ассоциации, состоящие из тростника обыкновенного и рогоза узколистного. Данные виды были выявлены в 2011 г. В 2016 г. они

образовывали заросли с проективным покрытием до 30 %, обилие соответствовало 3 баллам. Среди зарослей рогоза и тростника в качестве примеси отмечались стрелолист стрелолистный, частуха подорожниковая и ситняг игольчатый.

Растения с плавающими листьями были представлены горцем земноводным. Вид произрастал единичными экземплярами или небольшими группами (по 3–5 растений) в юго-западной части озера.

Погруженные растения были представлены лобелией Дортмана, полушником озерным и единичными экземплярами водяного мха.

Лобелия Дортмана отмечалась в литоральной зоне на глубинах от 0,3 до 0,8 м по всему периметру озера. Отсутствовала она только в пляжных зонах озера. Ее обилие колебалось от 2–3 баллов на периферии зарослей до 4 баллов в оптимальных условиях произрастания. Проективное покрытие снизилось и изменялось от 10 до 60 % соответственно. Полушник озерный произрастал на глубинах 0,6–2,8 м, что свидетельствует о сокращении площади и глубины его распространения.

Изменения в характере и степени зарастания оз. Белое проявились в формировании пояса надводных растений, распространении новых видов (тростника обыкновенного, рогоза узколистного), сокращении зарастания озера с 30 до 10 % площади озера, причем преимущественно за счет погруженных растений. Видимо, такие изменения связаны с активным рекреационным использованием прилегающих к водоему территорий и самой акватории. Здесь находятся оздоровительные лагеря, развит (в теплое время года) временный отдых на берегах озера.

В настоящее время полоса надводных макрофитов, представленных, в основном, тростником, сформировалась окончательно. Прерывается полоса тростника лишь у входов в воду. В западной части озера в формировании полосы воздушно-водных растений также участвуют осока вздутая и дербенник иволистный (*Lythrum salicaria* Blush), на востоке встречается ситняг игольчатый. Частуха подорожниковая отмечена не была. Полушник озерный в озере произрастает отдельными угнетенными экземплярами у западного берега на глубинах 1,3–1,7 м. Лобелия Дортмана, ранее формировавшая сплошную полосу, распространена лишь у западного побережья озера на глубинах от 0,25 до 1,60 м. Характер ее распространения показан на рис. 3. Горец земноводный обнаружен не был, поэтому ярус растений с плавающими листьями в озере отсутствует.



Рис. 3. Заросли лобелии Дортмана в западной части оз. Белое (Лунинецкий район), июль 2023 г.

Fig. 3. Thickets of *Lobelia dortmanna* in the western part of Lake Beloe (Luninets district), July 2023

Таким образом, в оз. Белое наблюдается деградация высшей водной растительности, выражающаяся в уменьшении степени зарастания с 35 % площади акватории до 3,2 % [30]. Практически полностью исчезли погруженные макрофиты, доминирующая роль принадлежит воздушно-водным.

На оз. **Свитязь** расположен пункт мониторинга высшей водной растительности, поэтому динамика видового состава и площади распространения макрофитов также изучена хорошо. По результатам флористических исследований озера в 1989 г. в списке видов приводились такие виды, как рогоз узколистый, лютик жестколистный, водяной мох и два вида, внесенные в Красную книгу Республики Беларусь: каулия гибкая и гидрилла мутноватая, которые во время летнего обследования водоема в июле 2000 г. не обнаружены. Изменение характера зарастания оз. Свитязь отражено на рис. 4.

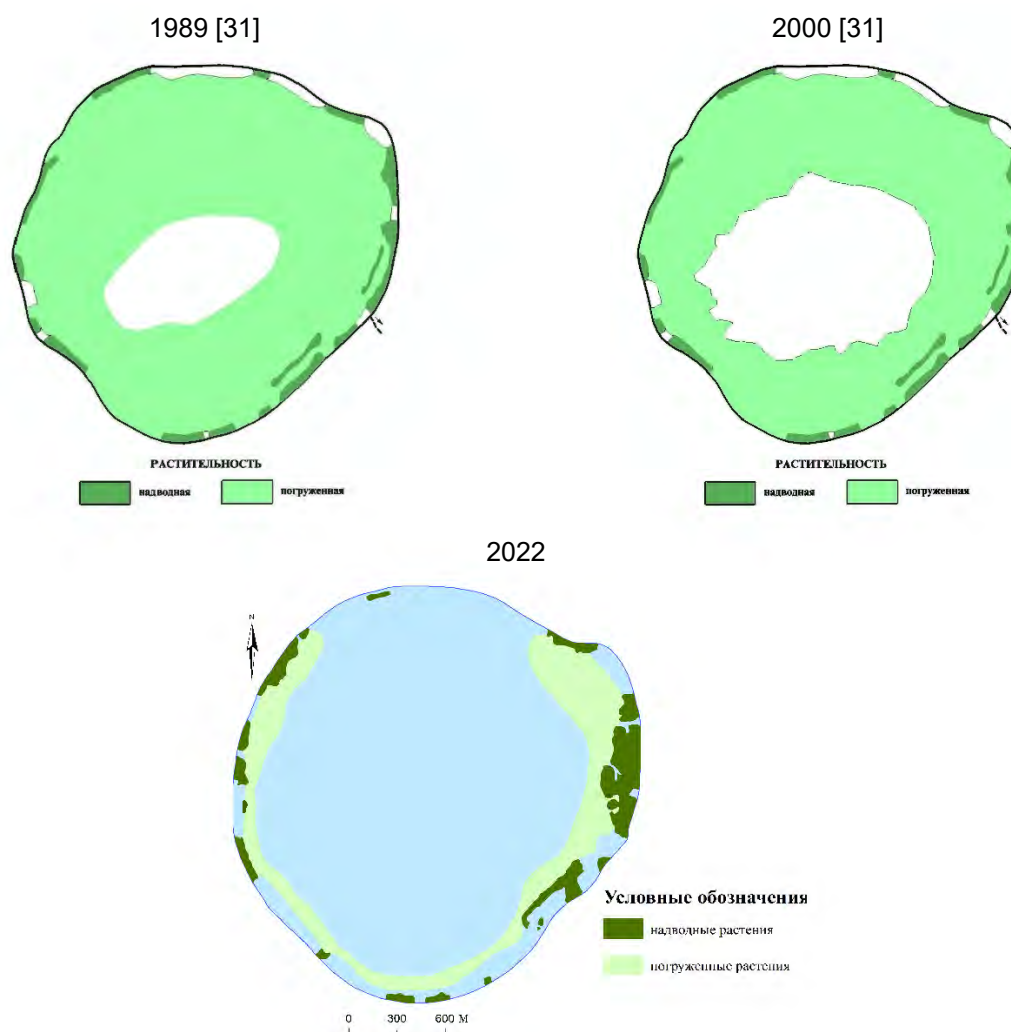


Рис. 4. Динамика площади и характера зарастания оз. Свитязь, 2000–2023 гг.

Fig. 4. The dynamics of overgrowth area and nature in Lake Svityaz, 2000–2023

Группа формаций полупогруженных растений в оз. Свитязь была представлена тремя видами гидрофитов (тростником обыкновенным, болотницей болотной, или ситнягом болотным, и камышом озерным) и одним видом гигрофитов (камышом лесным, небольшая куртина которого произрастала в зоне заплеска у западного берега озера).

Основным ценозообразователем полосы надводных или полупогруженных растений в озере являлся тростник обыкновенный, образующий прерывистую местами с лагунами полосу шириной в среднем 25 м (при максимальной ширине полосы до 200–250 м вдоль восточного берега). Тростниковые заросли были негустые (от 25 до 70 экз/м²), средняя их высота достигала 1,7 м, в отдельных местах вдоль восточного берега – до 2,5 м.

Вдоль восточного берега в районе вытока р. Своротва на глубинах до 0,5 м были отмечены разреженные заросли болотницы, или ситняга болотного. Почти повсеместно, за исключением отдельных участков вдоль южного берега, нижний (подводный) ярус полосы надводных растений сформировала прибрежница одноцветковая, которая образовала заросли с проективным покрытием 70–100 %. Вдоль

восточного и северо-западного берегов наряду с прибрежницей в нижнем ярусе часто встречалась лобелия Дортмана [25].

В целом по озеру надводные растения занимали площадь 0,16 км², что составляло около 9 % площади озера и формировало биомассу 48 т воздушно-сухого вещества (при средней биомассе тростниковых зарослей 0,300 кг/м²).

Растения с плавающими листьями в оз. Свитязь были представлены двумя видами: горцем земноводным (*Polygonum amphibium* L.) и рдестом плавающим (*Potamogeton natans* L.), которые занимали совсем незначительные площади. В северо-западной части озера, у самого берега, на глубинах 0,2–0,8 м горец земноводный с рдестом плавающим образовали пятно площадью 300 м², и в юго-восточной части озера в зарослях тростника были отмечены единичные экземпляры рдеста плавающего.

В подводном растительном покрове оз. Свитязь прослеживалась четкая закономерность. Глубины 0,3–1,8 м являлись экологической нишей полностью погруженных в воду низкорослых придонных растений – прибрежницы одноцветковой и лобелии Дортмана – видов, занесенных в Красную книгу Республики Беларусь. Прибрежница одноцветковая явно доминировала в этой полосе растений, образуя сплошной пояс вдоль берегов как чистых формаций, в основном на глубинах 1,0–1,5 м, так и смешанных с лобелией, на глубинах до 1,0 м, реже – с элодеей канадской, на глубинах 1,5–1,8 м. Лобелия произрастала только на глубинах от 0,3 до 1,0 м у западного и северо-западного берегов.

В озере отмечено произрастание охраняемого вида – полушника озерного: небольшие фрагменты сплошных зарослей в северо-западной части озера на глубинах 1,7–1,8 м и редкие экземпляры полушника вместе с лобелией и прибрежницей по зарослям тростника на глубине 0,7 м в 100–150 м севернее беседки.

Четвертым видом охраняемых растений, произрастающих в оз. Свитязь, являлась нителла грациозная – водоросль из семейства харовых водорослей, образовавшая чистую формацию с проективным покрытием 30 % на глубине 1,5 м вдоль северо-северо-западного берега площадью не более 10 м².

С учетом проективного покрытия под зарослями низкорослых придонных гидрофитов находилось 0,2 км², что составило немногим более 11 % площади озера. Общая биомасса подводных растений этой зоны оценивалась в 60 т воздушно-сухого веса, при средней биомассе прибрежницы 0,250 кг/м² зарослей [25].

Глубины от 2,0 м и до максимального распространения растительности (4,5 м) являлись экологической нишей в основном элодеи канадской и рдестов, причем среди последних чаще встречался длиннейший, реже – блестящий и сплюснутый и еще реже – курчавый. Элодея канадская явно доминировала в зарослях. Причем в северной части озера она достигала максимального развития на глубинах 3,0–4,5 м (средняя биомасса – 0,300 кг/м², проективное покрытие – 70 %), в южной части озера наиболее густой покров элодеи наблюдался на глубинах 2,5 м, редкие заросли элодеи – на глубинах 4,5 м, чаще встречался рдест длиннейший, край растительности был неровный. Проективное покрытие дна в зарослях рдестов не превышало 50 %. Биомасса широколистных рдестов составляла в среднем до 0,200 кг/м². Всего заросли элодеи совместно с рдестами занимали 0,78 км². Общая биомасса их оценивалась в 156 т воздушно-сухого веса.

В целом озеро зарастало на 65 %, а биомасса макрофитов оценивалась в 264 т воздушно-сухого вещества, из них около 85 % приходилось на долю подводных растений. Анализ соотношения продуктивности двух автотрофных сообществ в экосистеме водоема макрофитов (около 40 г/м³) и фитопланктона (менее 10 г/м³) говорит о том, что основная продукционно-деструкционная функция в экосистеме водоема принадлежала полностью погруженным растениям, степень развития которых определяла качество воды в оз. Свитязь. В настоящее время из-за несоблюдения режима охраны озера от дополнительного эвтрофирования и загрязнения со стороны окружающей озеро территории этот баланс нарушается. Современная картина зарастания оз. Свитязь в сравнении с данными прошлых лет исследований, полученными разными авторами, позволяет сделать следующие выводы:

1. Сократилась глубина максимального произрастания подводных растений – с 7 до 2 м. Прибрежница одноцветковая встречается на глубинах от 0,2 до 1,5 м, полушник озерный формирует узкую полосу вдоль прибрежницы на глубинах 1,5–1,8 м.

2. Из подводного растительного покрова исчез водяной мох, по данным исследований 1980-х годов выстилавший дно на глубинах до 7 м.

3. Современными исследованиями не подтверждено произрастание в озере трех охраняемых видов растений: каулинии гибкой (*Caulinia flexilis* Willd) и гидриллы мутовчатой (*Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle), упоминавшихся при обследовании озера в 1990-х годах (сведения П. В. Парфенова).

4. Произошла структурная перестройка в видовом составе растительного сообщества. Сокращение ареала полушника озерного и исчезновение водяного мха, увеличение площади под зарослями элодеи канадской и широколистных рдестов, а также появление в подводном растительном покрове рдеста курчавого свидетельствует об увеличении степени трофности водоема.

Изучение характера распространения водной растительности **оз. Белое (Полоцкий район)** проводилось в 1977, 2022 и 2023 г. В 1977 г. высшей водной растительностью было занято около 20 % площади озера. Морфометрические особенности котловины (узкая литораль и крутая сублитораль) препятствовали развитию растительности, но высокая прозрачность давала возможность заходить макрофитам (рдест сплюснутый) на большую глубину (8,4 м). Глубина распространения полупогруженных макрофитов достигала 1,6 м, а растений с плавающими листьями – до 2,0 м. Мхи встречались до глубины 12,7 м [26].

Из водно-болотных растений в озере встречались осоки, хвощ, ситняг. Полупогруженные растения были представлены в основном тростником и вообще не получили развития в акватории озера. Они не образовывали сплошной полосы, а встречались лишь на коротких участках берега. Максимальная ширина распространения полупогруженных растений была отмечена на северо-западе и составила 150 м.

Растения с плавающими листьями встречались только в заливах. Из них отмечены горец земноводный, кубышка и рдест плавающий.

Погруженные макрофиты были представлены двумя видами рдестов (пронзеннолистным и сплюснутым), урутью и элодеей [26]. Из особенностей зарастания следует отметить бедность видового состава макрофитов и произрастание в озере *Isoëtes lacustris*.

Среди изменений, произошедших в характере распространения высшей водной растительности, следует отметить увеличение площади произрастания тростника и ширины полосы, занятой им. На северо-востоке озера по данным дистанционного зондирования Земли она достигает 250 м. Растения с плавающими листьями распространены в основном в заливах, а также единичные экземпляры кубышки, горца земноводного и рдеста плавающего присутствуют среди зарослей тростника. Ширина полосы кубышки в северных заливах достигает 50 м.

Полушник озерный произрастает в северо-восточной части озера на глубинах 1,3–4,0 м. Местами, на глубинах около 2,5 м, он формирует смешанные ассоциации с элодеей канадской. По данным И. И. Шимко и И. П. Вознячук, в оз. Белое на глубинах 0,5–1,2 м отмечен также полушник колючеспоровый (*Isoëtes echinospora* Durieu), отличающийся от полушника озерного наличием шипов на макроспорах. Внешними различиями могут служить более тонкие, мягкие, дугообразно согнутые листья полушника колючеспорового, но основным его диагностическим признаком является именно строение спор [6]. Похожие по морфологическим признакам растения были зафиксированы авторами в феврале 2023 г. на глубинах 2,5–3,0 м в северо-восточной части озера. Возможно, в водоеме произрастают оба вида полушника, так как они характеризуются схожими экологическими условиями.

При первом обследовании в прибрежной полосе **оз. Большое Островито** росли тростник, рогоз широколистный, сабельник болотный, осоки. Надводная растительность образовывала полосу вдоль берега шириной до 10 м. Водяные мхи и полушник озерный сплошь покрывали дно озера до глубины 5 м. Кроме полушника в озере встречался еще один редкий вид – ежеголовник злаковый (*Sparganium gramineum* Georgi), распространение которого в Беларуси требует уточнения и дальнейшего изучения. Растительный мир озера отличался бедностью видового состава макрофитов. Полупогруженные, а также растения с плавающими листьями (вахта, осока, камыш, тростник, рогоз, кубышка, горец) не образовывали сплошной полосы, а встречались в единичных экземплярах, образуя разреженные участки до глубины 1,0–1,7 м. Полушник озерный произрастал вдоль берега до глубины 2,0 м, глубже, почти всю профундальную часть озера до глубины 5 м, покрывал водяной мох [26].

Результаты исследований свидетельствуют об уменьшении глубины распространения полушника озерного до 1,3 м у северо-западного берега и деградации зарослей водяного мха. Площадь распространения водных растений сократилась с 91 % площади озера в конце 1970-х годов до 21 % в 2023 г.

Высшая водная растительность в **оз. Глубокое** как при первом обследовании водоема, так и сейчас, развита слабо. Она представлена всего девятью видами: тростником обыкновенным, горцем земноводным, осокой омской, полушником озерным, ситником скученным, водяным мхом *Drepanocladus*, кубышкой желтой, белокрыльником болотным, сабельником болотным.

Надводные растения представлены тростником обыкновенным, осокой омской и ситником скученным. Единственный фитоценоз тростника обыкновенного протяженностью 30 м и шириной 3,5 м был приурочен к северной части озера, где занимал песчаные грунты и глубины от уреза воды до 0,8–1,0 м. Обилие (по шкале Друде) не превышало 2 баллов, покрытие составляло всего 15 % [25]. Редкие заросли осоки омской были характерны почти для всей литорали озера: отдельные куртины ее находились на расстоянии 2,0–5,0 м одна от другой при глубине произрастания до 0,4–0,5 м. Также приурочена к песчаным грунтам. В ряде мест к осоке омской примешивались очень редкие и низкорослые куртины тростника обыкновенного. У восточного и южного берегов большого плёса, а также вокруг острова были отмечены единичные куртины ситника скученного, приуроченные к песчаным грунтам. Отдельные растения его достигали в высоту 50 см. Схемы зарастания озера в 2011 и 2023 г. показаны на рис. 5.

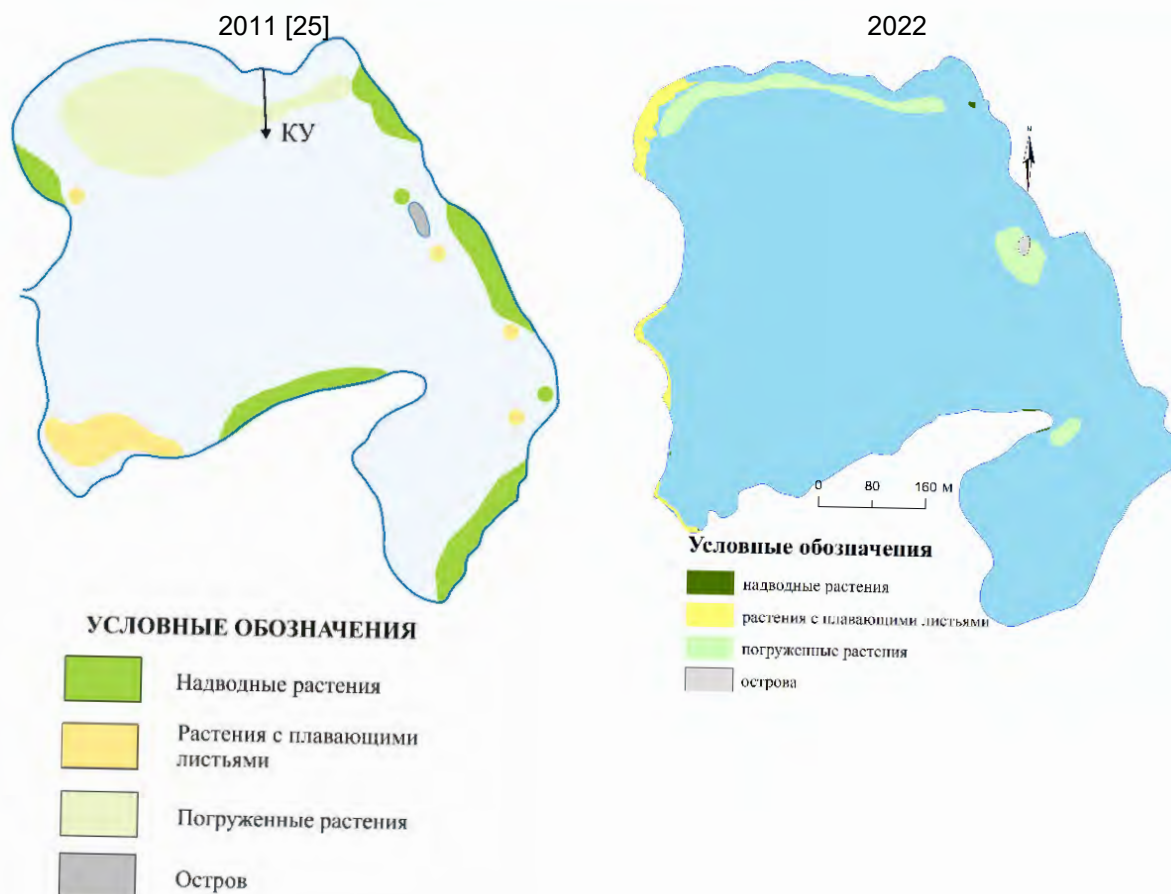


Рис. 5. Динамика площади и характера зарастания оз. Глубокое, 2011–2023 гг.

Fig. 5. The dynamics of overgrowth area and nature in Lake Glubokoe, 2011–2023

Растения с плавающими листьями были представлены кубышкой желтой, образующей чистые ассоциации, и горцем земноводным, произрастающим единичными экземплярами в юго-западном заливе, а также у острова. Пятна кубышки желтой площадью от 50 до 100 м² спорадически встречались на литорали озера, но были наиболее развиты в северо-западном и юго-западном заливах.

В растительном покрове оз. Глубокое полностью отсутствовали широколистные рдесты, что обусловлено отсутствием необходимых биогенных элементов в донных грунтах и воде озера. Погруженные макрофиты были представлены полушником озерным и водяным мхом и приурочены исключительно к наиболее пологому участку литорали у северного берега. Полушник озерный занимал пространство протяженностью 140 м и шириной 30 м.

Южнее границы полушниковой фитоценозы находился фитоценоз водяного мха, занимавший песчаные грунты, слегка покрытые тонким слоем тонкодетритного сапропеля на глубине от 2 до 7 м (максимальная глубина произрастания растений). Обилие – 3 балла, проективное покрытие – около 15 %.

При обследовании оз. Глубокое в 2011 г. все заросли полушника и водяного мха оказались густо покрытыми нитями массово развивающейся водоросли мужоции (*Mougetia*), из-под густых сплетений которой едва заметны верхушки шиловидных листьев полушника и пятна мха. К 2022–2023 гг. на севере озера произошло сокращение глубины произрастания полушника [29]. Если ранее он произрастал в северной части озера на глубинах 0,7–4,0 м, то в 2023 г. был обнаружен на глубинах 0,7–2,2 м. Однако был найден новый участок его распространения, ни в одном исследовании ранее не упомянутый. Полушник полукольцом обрамлял остров (за исключением севера и северо-востока) и произрастал на глубинах от 0,9 до 4,0 м, где формировал заросли с проективным покрытием 100 %. Водяной мох глубже 3,5 м не отмечался. Среди прочих изменений в характере зарастания озера следует отметить сокращение количества куртин осоки на расстоянии нескольких метров от берега. Сейчас она произрастает лишь узкой полосой вдоль уреза.

Все произрастающие в оз. Глубокое макрофиты образуют чистые ассоциации, что свидетельствует о начальном этапе зарастания озера.

В оз. **Бредно** зарегистрировано всего лишь семь видов макрофитов, которые образовали три полосы: воздушно-водных растений, растений с плавающими листьями и погруженных макрофитов. На границе литорали и суши почти по всей длине береговой линии небольшими, но хорошо развитыми кочками произрастала осока ольская. Отдельные ее кочки у восточного мыса росли на расстоянии до 15 м от берега в ассоциации *Lobelia dortmanna*, но чаще всего она отмечалась среди зарослей тростника южного. Хвощ речной как вид был представлен единичными растениями и в образовании растительного покрова участия практически не принимал. Растения высотой около 80 см отмечались на песчаных грунтах на глубине 50 см в северо-западной части озера.

Полосу воздушно-водных растений формировали *Carex* sp. *Phragmites australis* и *Lobelia dortmanna*. Фитоценозы тростника были приурочены к восточной и северной частям озера. Чистые фитоценозы тростника занимали наиболее мелководную часть литорали с песчаными грунтами. Группировки тростника были разрежены (обилие равно 2–3 баллам, покрытие составляет 15–25 %).

Заросли лобелии Дортмана занимали песчаные, иногда с прослойками торфа грунты на глубине от 30 до 100 см и были распространены на 1/3 доступной для нее площади литорали. Ее обилие колебалось от 2–3 баллов на периферии зарослей до 6 баллов в оптимальных условиях произрастания. Проективное покрытие изменялось от 20 до 90 % соответственно. Чистые фитоценозы лобелии занимали 0,50 га. Все это свидетельствовало о том, что популяция *Lobelia dortmanna* в оз. Бредно находилась в оптимальных для своего произрастания условиях.

Полоса растений с плавающими листьями в оз. Бредно была представлена фрагментарно чистыми несмешивающимися фитоценозами кубышки желтой и кувшинки белой [10].

Отдельные куртины кубышки желтой занимали площадь от 40 до 1000 м² и были приурочены главным образом к восточной и юго-восточной частям озера, предпочитая глубины от 70 до 120 см и песчаные грунты. Обилие кубышки в ее фитоценозах колебалось от 3 до 5 баллов, проективное покрытие – от 40 до 80 %.

Группировки кувшинки белой были характерны для литорали западной и северо-западной частей озера. Куртины кувшинки занимали площадь от 25 до 150 м² и были приурочены к мягким песчано-илистым грунтам. Глубина ее произрастания достигала от 100 до 180 см. Обилие было равно 5–6 баллам, проективное покрытие – 70–100 %. В оз. Бредно кувшинка белая обильно цвела и плодоносила. Условия произрастания кувшинки белой в оз. Бредно близки к оптимальным.

Полоса погруженных растений в оз. Бредно была представлена *Isoetes lacustris*, который приурочен к песчаной литорали с глубинами от 60 до 150 см. Заросли его отсутствовали лишь в юго-западной части водоема, где дно покрыто илистыми отложениями. Обилие полушника озерного колебалось от 3 баллов на периферии до 6 баллов в оптимальных для произрастания условиях. Проективное покрытие составляло 30–60 %.

За последнее десятилетие в характере зарастания озера произошли значительные изменения. Из-за уменьшения прозрачности воды и усиления процессов эвтрофирования популяция полушника сокращается. В настоящее время он произрастает южнее и восточнее мыса на глубинах до 2 м. Глубже границы произрастания полушника до глубины 4 м дно покрыто густыми зарослями мха, предположительно относящегося к виду *Drepanocladus sendtneri* (Schimp. ex H. Müll.) Warnst. Сократилась также площадь и густота зарослей лобелии. Ее обилие в настоящее время не превышает 4 баллов. К северу от мыса погруженные растения отсутствуют, так как донные отложения находятся в гелеобразном состоянии, что ограничивает возможности по укоренению макрофитов.

В оз. **Чербомысло** в ярусе надводных макрофитов доминирует тростник обыкновенный, реже встречаются осока, камыш озерный (ранее отмечен не был), рогоз узколистный и хвощ. Они образуют прерывистую полосу шириной от 1 до 35 м. Наибольшая ее ширина отмечена в заливах на севере и северо-востоке озера.

Среди растений с плавающими листьями встречаются горец земноводный, кубышка желтая, рдест плавающий, ежеголовник длиннолистный. Распространены они на глубинах до 2 м, ширина полосы – до 30 м.

Погруженные растения произрастают на глубинах от 0,3 до 2,2–2,5 м и представлены полушником озерным. Полоса его прерывистая, шириной до 80 м. На сильно заиленных участках дна погруженные растения отсутствуют. Наиболее широкое распространение полушник озерный получил вблизи болотных массивов на севере и юге озера, наибольшая глубина распространения (2,5 м) отмечена в восточной части водоема.

Изменения в характере зарастания оз. Чербомысло проявляются в сокращении глубины распространения погруженных макрофитов [29] с 4,0 м в 1977 г. до 2,2–2,5 м в 2023 г. Причиной этого является ошибка при реконструкции грунтовой дороги Большое Ситно – Белое. Из-за установки дренажной трубы под дорогой на вытоке из озера без учета гипсометрического положения уреза воды произошел подпор, повлекший подъем уровня воды, а приток кислых вод с верхового болота, расположенного к югу

от озера, был ослаблен. Полушник озерный – ацидофильный вид, для которого наличие притока вод с низким водородным показателем является важным условием произрастания.

Впервые высшую водную растительность оз. *Ильгиния*, расположенного в заповедной зоне НП «Нарочанский», изучали сотрудники научно-исследовательской лаборатории озераведения в 2018 г. Повторные исследования были проведены в 2022 и 2023 г. За столь короткий промежуток времени динамику зарастания водоема проследить не удалось, но факторы распространения макрофитов при каждом полевом исследовании анализируются все более детально. При высокой прозрачности воды, менявшейся от 4,2 м в 2018 г. до 5,0 м в 2023 г., озеро отличается крайне бедным видовым составом макрофитов, а также небольшой площадью их распространения (15 % площади водоема). Надводные растения не образуют полосы, произрастают отдельными участками и представлены в основном осокой. На востоке озера до глубины 0,6 м встречается хвощ речной, на западе – вахта трехлистная. Они произрастают на 2,5 % площади озера. Растения с плавающими листьями (кувшинка и кубышка) также не получили широкого распространения. Произрастают они у берега до глубины 1,5 м и занимают 2,1 % площади водной поверхности. Погруженные растения, зафиксированные в южной части озера на глубинах от 4,0 до 5,0 м только с помощью эхолота, нуждаются в дополнительном изучении. Распространение макрофитов на севере озера сдерживается морфометрическими особенностями котловины. Очень крутой подводный склон не способствует формированию растительных ассоциаций. Донные отложения литорали здесь представлены высокоорганическими сапропелями, на которых многие виды растений не могут укорениться, поэтому единственной зоной с оптимальными для развития погруженных растений условиями является пологая сублитораль.

Выводы.

1. Наиболее сильные изменения в характере зарастания наблюдаются в озерах Свитязь и Белое (Лунинецкий район), испытывающих высокую рекреационную нагрузку, а также озерах Большое Островито и Бредно. За 30 лет в оз. Свитязь глубина распространения погруженных макрофитов сократилась с 7 до 2 м, а обилие и проективное покрытие полупогруженных макрофитов возросло. В оз. Белое почти полностью исчез *Isoëtes lacustris* L., формировавший ярус погруженных растений, и образовалась ранее отсутствовавшая полоса воздушно-водных растений. Общая площадь зарастания озера сократилась с 35 % площади акватории до 3,2 %. В оз. Большое Островито практически исчез водяной мох *Fontinalis* sp., ранее распространенный на глубинах до 5 м, в оз. Бредно водяной мох *Drepanocladus* распространился до глубины 4 м. В оз. Глубокое вокруг острова на глубинах до 4 м обнаружен новый участок произрастания *Isoëtes lacustris* L. В оз. Чербомысло причина уменьшения глубины и площади распространения вида связана с ослаблением притока болотных вод из-за их подпора.

2. В оз. Белое (Полоцкий район) изменение площади зарастания выражено меньше. Короткий период исследования оз. Ильгиния не позволяет проследить динамику степени зарастания водоема.

3. Основные причины деградации макрофитов – увеличение антропогенной нагрузки и изменение гидрологического режима.

4. Для предотвращения дальнейшей эвтрофикации исследуемых озер рекомендуется соблюдение режима охраны с ограничением их использования в рекреационных целях. Для этого необходимо постоянное экологическое просвещение населения. Перспективным видится также регулирование численности отдыхающих с целью недопущения превышения рекреационной емкости территорий малых водосборов. Это позволит сохранить охраняемые виды макрофитов.

Благодарность. Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект X22M-069).

Acknowledgements. The research is funding by Belarusian republican foundation for basic research (project X22M-069).

Список использованных источников

1. Kolodziejczyk, I. Stosunki florystyczne jeziora Swietzi / I. Kolodziejczyk. – Warszawa : Prace Towarz. Nauk., 1916. – S. 1–62.
2. Козловская, Н. В. Хорология флоры Белоруссии / Н. В. Козловская, В. И. Парфенов. – Минск, 1972. – 20 с.
3. Курлович, Н. Н. Новые местонахождения и основные условия произрастания полушника озерного в озерах Белоруссии / Н. Н. Курлович // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 2, Хим. Биол. Геол. Геогр. – 1979. – № 1. – С. 53–56.
4. Вынаев, Г. В. О новых и контролируемых местонахождениях редких видов высших водных растений Беларуси / Г. В. Вынаев, Г. С. Гигевич, Д. В. Дубовик // Красная книга Республики Беларусь: состояние, проблемы, перспективы : материалы респ. науч. конф. / М-во образования Респ. Беларусь. – Витебск : Витебский гос. ун-т., 2002. – С. 64–65.

5. Вынаев, Г. В. О новых и контролируемых местонахождениях редких видов высших водных и околоводных растений Беларуси / Г. В. Вынаев, Г. С. Гигевич, Д. В. Дубовик // Теоретические и прикладные проблемы современной лимнологии : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 30-летию кафедры общего земледования и лаб. озероведения БГУ, 20–24 окт. 2003 г. – Минск, 2003. – С. 121–128.
6. Шимко, И. И. Полушник колючеспоровый (*Isoëtes echinospora* Durieu) новый вид растений для флоры Беларуси / И. И. Шимко, И. П. Вознячук // Актуальные проблемы изучения и сохранения фито- и микобиоты : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 12–14 нояб. 2013 г. – Минск : Изд. центр БГУ, 2013. – 467 с.
7. Растительность порядка Oenanthetalia aquaticaе в озерах Белорусского Поозерья / С. Э. Латышев [и др.] // Ботаника (исследования). – 2022. – № 51. – С. 85–94.
8. Дорофеев, А. М. Растительность озера Бредно / А. М. Дорофеев, В. П. Мартыненко // Веснік ВДУ. – 1997. – № 4 (6). – С. 76–80.
9. Дорофеев, А. М. Растительность озера Глубокое / А. М. Дорофеев, В. П. Мартыненко // Веснік ВДУ. – 1999. – № 1 (11). – С. 67–72.
10. Дорофеев, А. М. Растительность озера Чербомысло / А. М. Дорофеев, В. П. Мартыненко, А. В. Шарендо // Веснік ВДУ. – 1999. – № 3. – С. 71–76.
11. Власова, А. Б. Охрана и мониторинг состояния популяций редкого вида аквафлоры Беларуси полушника озерного (*Isoëtes lacustris* L.) : метод. рекомендации / А. Б. Власова, Б. П. Власов, М. А. Джус. – Минск : БГУ, 2013. – 32 с.
12. Власов, Б. П. Особенности уникальных озер Беларуси как формирующая основа ресурсов реликтовых видов *Isoëtes lacustris* L. и *Lobelia dortmanna* L. / Б. П. Власов // Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География. – Минск, 2014. – С. 62–67.
13. Эколого-фитоценотическая дифференциация, генетическая изменчивость и структура популяций реликтового вида аквафлоры *Isoëtes lacustris* L. в Беларуси / А. Б. Власова [и др.] // Генетика. – 2021. – № 57 (2). – С. 185–195.
14. Распопов, И. М., Видовое и ценотическое разнообразие макрофитов озера Красного в многолетнем аспекте / И. М. Распопов, А. Г. Русанов // Фиторазнообразие Восточной Европы. – 2010. – № 8. – С. 67–74.
15. Русанов, А. Г. Изменение водной растительности под влиянием флуктуаций гидрологического режима в эвтрофирующемся озере / А. Г. Русанов // Региональная экология. – 2018. – № 4 (54). – С. 53–61. doi:10.6094/1026-5600-2018-4-53-61
16. Кузьмичев, А. И. Структура гидрофитобиоты озер зоны краевых оледенений Северо-Запада Европейской России / А. И. Кузьмичев, А. Н. Краснова, И. Ю. Ершов // Журнал Сибирского федерального университета. – 2009. – № 3. – С. 299–312.
17. Mjelde, M. A water level drawdown index for aquatic macrophytes in Nordic lakes / M. Mjelde, S. Hellsten, F. Ecke // Hydrobiologia. – 2012. doi:10.1007/s10750-012-1323-6
18. Čtvrtlíková, M. The effect of temperature on the phenology of germination of *Isoëtes lacustris* / M. Čtvrtlíková, P. Znachor, J. Vrba // Preslia. – 2014. – Vol. 86, № 3. – P. 279–292.
19. Markowski, M. Trophic state of lobelia lakes subjected to strong anthropogenic pressure located close to the Tricity area (northern Poland) / M. Markowski // Limnol. Rev. – 2017. – Vol. 17, № 4. – P. 195–205. doi:10.1515/limre-2017-0018
20. Mäemets, H. Natural and Anthropogenic Impacts on the Macrophytes of Soft-Water Lakes of Estonia / H. Mäemets. doi:10.5772/intechopen.109810
21. Markowski, M. Types of geoecosystems of the lobelia lakes of the tricity area / M. Markowski, M. Kwidzińska // Quaestiones geographicae. – 2015. – № 34 (1). – P. 15–25.
22. The Effect of Human Impact on the Water Quality and Biocoenoses of the Soft Water Lake with Isoetids: Lake Jeleń, NW Poland / P. Klimaszyk [et al.] // Weather. – 2020. – № 12 (4), P. 945. doi:10.3390/w12040945
23. Soft-Water Lobelia Lakes in Poland / D. Borowiak [et al.] // Springer Nature Switzerland AG 2020 ; E. Korzeniewska, M. Harnisz (eds.). Polish River Basins and Lakes. – Part I, The Handbook of Environmental Chemistry 86. doi:10.1007/978-3-030-12123-5_5
24. Vöge, M. Monitoring the vitality of *Isoëtes lacustris* by using a non-destructive method / M. Vöge // Limnol. Rev. – 2014. – Vol. 14, № 3. – P. 153–158. doi:10.1515/limre-2015-0005
25. Проведение наблюдений за ресурсами водной растительности, а также за средой ее произрастания : отчет о НИР / БГУ ; рук. Б. П. Власов. – Минск, БГУ, 2000–2014. – № ГР 20162806.
26. Комплексное лимнологическое обследование озерных водоемов Белоруссии : отчет о НИР. – Минск : БГУ, 1973–1980. – ХД-ЛОЗ-671717.
27. Озёра Беларуси : справочник / Б. П. Власов [и др.]. – Минск : БГУ, 2004. – 284 с.
28. Larson, D. W. On reconciling lake classification with the evolution of four oligotrophic lakes in Oregon : abstr. ... PhD thes. / D. W. Larson. – Corvallis, 1970. – 162 p.
29. Катанская, В. М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР / В. М. Катанская. – Л. : Наука, 1981. – 187 с.
30. Уязвимость экосистем acidотрофных озер Беларуси – мест обитания охраняемых видов флоры и фауны – к климатическим изменениям : отчет о НИР (промежут.) / БГУ ; рук. Н. Ю. Суховило. – Минск, 2023. – 76 с. – № ГР 20221196.
31. Гигевич, Г. С. Высшие водные растения Беларуси. Эколого-биологическая характеристика, использование и охрана / Г. С. Гигевич, Б. П. Власов, Г. В. Вынаев. – Минск : БГУ, 2001. – 231 с.

References

- Kołodziejczyk J. Stosunki florystyczne jeziora Świtezi. Warszawa, Prace Towarz. Nauk., 1916, pp. 330–331 (in Poland)
- Kozlovskaya N. V., Parfenov V. I. *Horologiya flory Belorussii* [Chorology of the flora of Belarus]. Minsk, 1972, 20 p. (in Russian)
- Kurlovich N. N. *Novye mestonahozhdeniya i osnovnye usloviya proizrastaniya polushnika ozernogo v ozerah Belarusi* [New locations and basic conditions for the growth of the lacustrine grasshopper in the lakes of Belarus]. *J. of the Belarusian State University, Series 2, Chemistry. Biology. Geography*, 1979, no. 1, pp. 53–56. (in Russian)
- Vynaev G. V., Gigeich G. S., Dubovik D. V. *O novykh i kontroliruemym mestonahozhdeniyah redkih vidov vysshih vodnykh rasteniy Belarusi* [On new and controlled locations of rare species of higher aquatic plants in Belarus]. Materialy resp. nauch. konf. "Krasnaya kniga Respubliki Belarus': sostoyanie, problemy, perspektivy" [Proc. of the republic sci. conf. 'Red Book of the Republic of Belarus: status, problems, prospects']. Vitebsk, Ministry of Education of Belarus Publ., 2002, pp. 64–65. (in Russian)
- Vynaev G. V., Gigeich G. S., Dubovik D. V. *O novykh i kontroliruemym mestonahozhdeniyah redkih vidov vysshih vodnykh i okolovodnykh rasteniy Belarusi* [On new and controlled locations of rare species of higher aquatic and semi-aquatic plants in Belarus]. Materialy Mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf., posvyashch. 30-letiyu kafedry obshchego zemlevedeniya i lab. ozerovedeniya BGU "Teoreticheskie i prikladnye problemy sovremennoj limnologii" [Proc. of the Int. sci.-pract. conf., dedicated 30th anniversary of the Department of General Geography and Laboratory of Lake Research BSU 'Theoretical and applied problems of modern limnology']. Minsk, 2003, pp. 121–128. (in Russian)
- Shimko I. I., Voznyachuk I. P. *Polushnik kolyuchosporovyy (Isoetes echinospora Durieu) novyj vid rasteniy dlya flory Belarusi* [Polushnik colyuchosporus (*Isoetes Echinospora Dureyu*) a new plant species for the flora of Belarus]. Sbornik statei II-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Aktual'nye problemy izucheniya i sohraneniya fito- i mikrobioty" [Proc. of the int. sci. and pract. conf. 'Current problems in the study and conservation of phyto- and mycobiota']. Minsk, BSU Publ., 2013, p. 467. (in Russian)
- Latyshev S. E., Merzhvinskij L. M., Vysockij Yu. I., Latysheva V. V. *Rastitel'nost' poryadka Oenanthetalia aquaticae v ozerah Belorusskogo Poozer'ya* [Vegetation of the order Oenanthetalia aquaticae in the lakes of the Belarusian Lake District]. *Botanika (issledovaniya) = Botany (research)*, 2022, no. 51, pp. 85–94. (in Russian)
- Dorofeev A. M., Martynenko V. P. *Rastitel'nost' ozera Bredno* [Vegetation of Lake Bredno]. *J. of the Vitebsk State University*, 1997, no. 4 (6), pp. 76–80. (in Russian)
- Dorofeev A. M., Martynenko V. P. *Rastitel'nost' ozera Glubokoe* [Vegetation of Lake Glubokoe]. *J. of the Vitebsk State University*, 1999, no. 1 (11), pp. 67–72. (in Russian)
- Dorofeev A. M., Martynenko V. P., Sharend A. V. *Rastitel'nost' ozera Cherbomyslo* [Vegetation of Lake Cherbomyslo]. *J. of the Vitebsk State University*, 1999, no. 3, pp. 71–76. (in Russian)
- Vlasova A. B., Vlasov B. P., Dzhus M. A. *Ohrana i monitoring sostoyaniya populyacij redkogo vida akvaflory Belarusi polushnika ozernogo (Isoetes lacustris L.)* [Protection and monitoring of the state of populations of a rare species of aquaflora of Belarus, the lake weed (*Isoetes lacustris* L.)]. Minsk, BSU Publ., 2013, 32 p. (in Russian)
- Vlasov B. P. *Osobennosti unikal'nykh ozer Belarusi kak formiruyushchaya osnova resursov reliktovykh vidov Isoetes L. i Lobelia dortmanna L.* [Features of the unique lakes of Belarus as the forming basis for the resources of relict species *Isoetes* L. and *Lobelia dortmanna* L.]. *J. of the Belarusian State University, Series 2, Chemistry. Biology. Geography*. Minsk, 2014, pp. 62–67. (in Russian)
- Vlasova A. B., Yuhimuk A. N., Dzhus M. A., Tuhfatullina M. S., Vlasov B. P. *Ekologo-fitocenoticheskaya differenciatsiya, geneticheskaya izmenchivost' i struktura populyacij reliktovykh vida akvaflory Isoetes lacustris L. v Belarusi* [Ecological and phytocenotic differentiation, genetic variability and population structure of the relict species of aquaflora *Isoetes lacustris* L. in Belarus]. *Genetika*, 2021, no. 57 (2), pp. 185–195. (in Russian)
- Raspopov I. M., Rusanov A. G. *Vidovoe i cenoticheskoe raznoobrazie makrofitov ozera Krasnogo v mnogoletnem aspekte* [Species and coenotic diversity of macrophytes of Lake Krasnoye in a long-term aspect]. *Phytodiversity of Eastern Europe*, 2010, pp. 67–74. (in Russian)
- Rusanov A. G. *Izmenenie vodnoj rastitel'nosti pod vliyaniem fluktuacij gidrologicheskogo rezhima v evtrofiruyushchemsya ozere* [Changes in aquatic vegetation under the influence of fluctuations in the hydrological regime in a eutrophicating lake]. *Regional Ecology*, 2018, no. 4 (54), pp. 53–61. doi:10.30694/1026-5600-2018-4-53-61
- Kuz'michev A. I., Krasnova A. N., Ershov I. Yu. *Struktura gidrofitobioty ozer zony kraevykh oledeneniya Severo-Zapada Evropejskoj Rossii* [Structure of hydrophytobionts and the North-West of European Russia]. *J. of Siberian Federal University, Biology*, 2009, no. 3, pp. 299–312. (in Russian)
- Mjelde M., Hellsten S., Ecke F. A water level drawdown index for aquatic macrophytes in Nordic lakes. *Hydrobiologia*, 2012. doi:10.1007/s10750-012-1323-6
- Čtvrtlíková M., Znachor P., Vrba J. The effect of temperature on the phenology of germination of *Isoetes lacustris*. *Preslia*, 2014, vol. 86, no. 3, pp. 279–292.
- Markowski M. Trophic state of lobelia lakes subjected to strong anthropogenic pressure located close to the Tricity area (northern Poland). *Limnol. Rev.*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 195–205. doi:10.1515/limre-2017-0018
- Mäemets H. Natural and Anthropogenic Impacts on the Macrophytes of Soft-Water Lakes of Estonia. doi:10.5772/intechopen.109810
- Markowski M., Kwizdińska M. Types of geoecosystems of the lobelia lakes of the tricity area. *Quaestiones geographicae*, 2015, no. 34 (1), pp. 15–25.

22. Klimaszuk P., Borowiak D., Rosińska J., Szel E., Wasielewska A., Kraska M. The Effect of Human Impact on the Water Quality and Biocoenoses of the Soft Water Lake with Isoetids: Lake Jeleń, NW Poland. *Weather*, 2020, no. 12 (4), p. 945. doi:10.3390/w12040945
23. Borowiak D., Piotrowicz R., Nowiński K. and Klimaszuk P. Soft-Water Lobelia Lakes in Poland. *Springer Nature Switzerland AG* 2020. E. Korzeniewska, M. Harnisz (eds.). Polish River Basins and Lakes, Part I, The Handbook of Environmental Chemistry 86. doi:10.1007/978-3-030-12123-5_5
24. Vöge M. Monitoring the vitality of *Isoetes lacustris* by using a non-destructive method. *Limnol. Rev.*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 153–158. doi:10.1515/limre-2015-0005
25. *Provedeniye nablyudeniy za resursami vodnoy rastitelnosti, a takzhe za sredoy yeye proizrastaniya* [Carrying out observations of the resources of aquatic vegetation, as well as the environment of its growth]. Research Report. Supervisor B. P. Vlasov. Minsk, BSU Publ., 2000–2014, no. SR 20162806. (in Russian)
26. *Kompleksnoye limnologicheskoye obsledovaniye ozernykh vodoyemov Belorussii* [Comprehensive Limnological Survey of Lakes in Belarus]. Research Report, Supervisor O. F. Yakushko. Minsk, BSU Publ., 1971–1980. EC-LOZ-671717. (in Russian)
27. Vlasov B. P., e. a. *Ozyora Belarusi* [Lakes of Belarus]. Minsk, 2004, 284 p. (in Russian)
28. Larson D. W. *On reconciling lake classification with the evolution of four oligotrophic lakes in Oregon*. Abstr. PhD thes. Corvallis, 1970, 162 p.
29. Katanskaya V. M. *Vysshaya vodnaya rastitelnost kontinentalnykh vodoyemov SSSR* [Higher aquatic vegetation of continental reservoirs of the USSR]. Leningrad, 1981, 187 p. (in Russian)
30. *Uyazvimost ekosistem atsidotrofnykh ozer Belarusi – mest obitaniya okhranyayemykh vidov flory i fauny – k klimaticheskim izmeneniyam* [Vulnerability of ecosystems of acidotrophic lakes of Belarus – habitats of protected species of flora and fauna – to climate change]. Research Report. Supervisor N. Yu. Sukhovilo. Minsk, BSU Publ., 2023, 76 p., no. SR 20221196. (in Russian)
31. Gigeich G. S., Vlasov B. P., Vynaev G. V. *Vysshiy vodnyye rasteniya Belarusi. Ekologo-biologicheskaya kharakteristika, ispol'zovaniye i okhrana* [Higher aquatic plants of Belarus. Ecological and biological characteristics, use and protection]. Minsk, BSU Publ., 2001, 231 p. (in Russian)

Информация об авторах

Нина Юрьевна Суховило – кандидат географических наук, заведующий НИЛ озераведения, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: SukhoviloNY@bsu.by

Дарья Борисовна Власова – младший научный сотрудник, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: VlasovaDB@bsu.by

Алексей Александрович Новик – кандидат географических наук, доцент, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: novikA@bsu.by

Борис Павлович Власов – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: Vlasov@bsu.by

Information about the authors

Nina Yu. Sukhovilo – Ph. D. (Geography), Head of the Lab. of lake research, Belarusian State University (Nezavisimosti av., 4, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: SukhoviloNY@bsu.by

Daria B. Vlasova – Junior Researcher, Belarusian State University (Nezavisimosti av., 4, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: VlasovaDB@bsu.by

Aliaksei A. Novik – Ph. D. (Geography), Associate Professor, Belarusian State University (Nezavisimosti av., 4, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: novikA@bsu.by

Boris P. Vlasov – D. Sc. (Geography), Professor, Chief Researcher, Belarusian State University (Nezavisimosti av., 4, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: Vlasov@bsu.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-84-97>
УДК 550.4:551.3(476.7)

Поступила в редакцию 10.11.2023
Received 10.11.2023

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПРУДОВ г. НЕСВИЖА

Ю. А. Романкевич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты геохимических исследований донных отложений русловых прудов г. Несвижа. Рассмотрены особенности распределения тяжелых металлов (ТМ) в донных отложениях и взаимосвязи элементов в системе донные отложения – почва в условиях города.

Установлены приоритетные в обогащении элементы (Cr, Cd и Zn). Выявлены две ассоциации тяжелых металлов (ТМ), характерные для донных отложений города (Cu–Zn–Ni и Cd–Pb). Отмечено образование сильных корреляционных связей в формировании ассоциаций как в донных отложениях, так и в почвах (Cu–Zn). Определена связь ассоциации Cu–Zn–Ni и зольности.

Рассчитаны факторные нагрузки. Установлены факторы, ответственные за формирование техногенной обстановки: выбросы от непромышленных установок для сжигания в жилом фонде, а также от дорожного транспорта и передвижных источников. Построена картосхема факторных нагрузок.

Ключевые слова: донные отложения; тяжелые металлы; геохимические коэффициенты; непараметрические методы исследований.

Для цитирования. Романкевич Ю. А. Распределение тяжелых металлов в донных отложениях прудов г. Несвижа // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 84–97.

DISTRIBUTION OF HEAVY METALS IN BOTTOM SEDIMENTS OF PONDS OF NESVIZH CITY

J. A. Ramankevich

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

Abstract. The results of geochemical studies of bottom sediments of riverbed ponds in the city of Nesvzh are presented. The features of the distribution of heavy metals (HM) in bottom sediments and the relationship of elements in the bottom sediments – soil system in urban conditions are considered.

Characteristic of the city's bottom sediments (Cu–Zn–Ni and Cd–Pb) have been identified. The formation of strong correlations in the formation of associations in both sediments and soils (Cu–Zn) was noted. The association of Cu–Zn–Ni and ash content is determined.

Factor loads are calculated. The factors responsible for the formation of a man-made environment have been identified: emissions from non-industrial combustion plants in residential buildings, as well as from road transport and mobile sources. A cartographic diagram of factor loads has been constructed. The interpretation of geochemical data has been performed.

Keywords: urban soils; heavy metals; geochemical data; nonparametric research methods.

For citation. Ramankevich J. A. Distribution of heavy metals in bottom sediments of ponds of Nesvzh city. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 84–97.

Введение. Основные закономерности условий, протекания процессов и формирования продуктов аллювиального литогенеза с геохимических позиций были сформулированы в 1960–70-е годы и освещены в работах В. А. Кузнецова, А. А. Лазаренко, Б. С. Лунева и Н. М. Страхова, Ю. В. Шумилова и др. [1–5 и др.]. Процессы аллювиальной миграции и аккумуляции вещества изложены также в работах М. А. Глаголевой, Г. С. Коновалова, Н. Т. Кузнецова, А. И. Перельмана, С. Л. Шиманович и др. Авторами установлено, что масштабы переноса вещества в различных состояниях (в растворенном, взвешенном и влекомом) и их взаимопереходы определяются гидрологией потока, геологическим и геоморфологическим строением, климатом, а также характером распространения растительного и почвенного покровов [1–5 и др.].

В. А. Кузнецовым, А. А. Лазаренко и др. установлено, что закономерности аллювиального литогенеза определяют степень концентрации, формы нахождения и парагенезисы химических элементов в связи с их миграцией в речных водах и взвесах, с осаждением и накоплением в осадках, ходом природных химических реакций, а также с геохимическими факторами и условиями литогенеза [1, 2, 4].

Н. М. Страховым сформулированы положения теории литогенеза в направлении понимания процессов миграции и аккумуляции химических элементов в речных долинах. Отмечается значительная роль миграции элементов в соединениях с органическим веществом. Показано, что формы миграции химических элементов определяются их физико-химическими свойствами, а также физико-географическими условиями водосборной территории.

Большой вклад в изучение естественных закономерностей аллювиального литогенеза на территории Беларуси в этот период внесли В. А. Кузнецов, Л. И. Матрунчик и многие другие исследователи [1, 2 и др.]. Были описаны аллювиальные отложения Беларуси, выявлены геохимические различия между бассейнами крупнейших рек (Днепр, Припять, Неман, Западная Двина) и др. Изучены аллювиальные комплексы отложений земной коры Беларуси в контексте их металлоносности. Велись исследования в направлении изучения форм нахождения, миграции и распространения микроэлементов в аллювии.

В дальнейшем, в 1980–90-е годы, получило развитие направление в области изучения техногенного воздействия на долинные ландшафты. С геохимических позиций В. К. и К. И. Лукашёвыми, а также К. П. Воскресенским классифицируются техногенные источники и факторы, влияющие на процессы седиментогенеза и геохимические аспекты литогенеза в речных долинах: сооружение водохранилищ и прудов, перераспределение речного стока между бассейнами, мелиорация земель, урбанизация, горные выработки, агротехнические и лесомелиоративные мероприятия, тепловые загрязнители, транспорт, промышленные предприятия [5, 6].

В числе геохимических последствий проявлений урбанизации В. К. и К. И. Лукашёвы выделяют увеличение минерализации речных вод, рост концентрации в водах поверхностного стока кислот, органических веществ, солей, металлов, нефтепродуктов и др. [5, 6]. Авторами установлена связь между формированием техногеохимических ореолов рассеяния и аномалий с залповыми сбросами в речную сеть промышленных и бытовых отходов; постепенным накапливанием химических элементов и соединений, поступающими в речную сеть в малых концентрациях и аккумулируемых в осадках; концентрированием элементов в долине веществами, являющимися активными адсорбентами и органоминералообразователями. Отличительными чертами таких ореолов и аномалий являются пространственная связь с городами, промышленными центрами и другими местами техногенной активности, наличие химических элементов и соединений, не свойственных природной окружающей среде [5, 6].

Ю. Е. Саёт и др. выделяют по речным донным осадкам техногеохимические ореолы для крупных (Cr, Ni, Be, Sr, V и Hg, Cu, Zn, Bi) и малых городов (Zn, Sn, B, Br), а также поселков (Bi, Sr, Mn, Mo, Ag) и свалок (Pb, Ni, Sr, Be и Co, Sn). Показано, что ассоциации элементов зависят от характера промышленного производства, положения места опробования в речной долине при максимальных концентрациях техногенных элементов в донных осадках замкнутых водоемов и тыловой части поймы [7].

Известны работы Е. П. Янина, посвященные роли техногенеза в формировании состава речных отложений. Автором изучены источники и пути поступления загрязняющих веществ в реки и речные илы урбанизированных районов, среди важнейший из которых отмечен поверхностный сток [8]. Отдельные публикации посвящены поведению в окружающей среде тяжелых металлов (ТМ), также скандия, ртути и фтора. Кроме того, в качестве загрязнителей изучены платиновые металлы, органические поллютанты, асбест, тальк, радионуклиды и др.

Вопросам техногенного загрязнения донных осадков и речных долин в целом посвящены работы О. В. Лукашёва, В. В. Савченко и др. [9–11]. С помощью многомерных статистических методов этими авторами выделены естественные ассоциации химических элементов. Установлена связь между составом ассоциаций донных отложений с гранулометрической дифференциацией вещества, органическим веществом и вхождением элементов в одни и те же минералы [9, 10].

Эколого-геохимическое изучение заповедных территорий Беларуси – еще одно направление для исследования процессов миграции и аккумуляции химических элементов в условиях природного эталона, которое активно развивалось в 1980-е годы под руководством К. И. Лукашёва. В 2007–2010 гг. результаты исследований пяти разновременных этапов программы комплексного геохимического мониторинга Березинского биосферного заповедника были обобщены О. В. Лукашёвым, В. М. Натаровым, В. В. Савченко и др. Установлено, что антропогенное воздействие на природные системы заповедника продолжает оставаться на уровне фонового загрязнения. Выявленные пространственно-временные вариации химического состава компонентов экосистем заповедника в основном обусловлены естественными причинами и с геохимических позиций могут продолжать рассматриваться как эталонные [9, 11].

Таким образом, в последние десятилетия многие авторы обращались к проблеме индикаторной роли донных отложений в оценке загрязнения водных экосистем [8, 11, 12 и др.]. Современные донные осадки рассматриваются как депонирующая среда для микроэлементов, накопление которых связано с изменением механических, физико-химических и биологических условий седиментации, а также поступлением техногенных веществ. Формирование микроэлементного состава осадков водоемов определяется ландшафтной структурой и освоенностью водосбора, литолого-петрографическими и геохимическими особенностями его пород, уровнем продукционно-деструкционных процессов в водоеме, его морфометрическими параметрами, т. е. всеми факторами, контролирующими седиментацию органического и минерального веществ. Загрязняющие компоненты поступают в водные системы в растворенной форме и в виде взвешенных частиц с локальными сбросами, а также в составе стока с водосборных территорий.

Представляется, что анализ накопления микроэлементов в донных осадках водоемов обусловлен техногенной обстановкой на водосборе и согласуется с результатами исследования почвенного покрова, что позволит повысить уровень понимания процессов миграции и аккумуляции веществ в условиях урбанизированных пространств.

Цель работы – выявить особенности накопления и пространственного распределения тяжелых металлов в донных отложениях прудов г. Несвижа. Объектом изучения стали донные отложения, представленные илами.

Исследования донных отложений водоемов г. Несвижа являются составной частью комплексных эколого-геохимических исследований малого города [13, 14]. Ранее было установлено, что приоритетными источниками загрязнения вод русловых прудов на территории г. Несвижа являются воды р. Уши, подземный и поверхностный сток, в меньшей степени влияют воды мелиоративных каналов, ручьев и технологических водоемов. На основании анализа данных за 50-летний период установлен факт ухудшения качества поверхностных вод, проявившийся в обогащении их макрокомпонентами, а также загрязнении биогенными веществами. Доказано, что качество вод в водоемах и водотоках обусловлено техногенной нагрузкой на их водосборы, основным фактором формирования которой является сельскохозяйственный [13]. Концентрации в водах прудов Ni (0,8–1,8 мкг/л), Cr (<2,00–2,00 мкг/л), Pb (3,3–8,8 мкг/л), Zn (2,6–9,7 мкг/л) и Cd (0,6–1,1 мкг/л) свидетельствуют об их обогащении данными металлами. Концентрация Cu (0,9–2,8 мкг/л) в отдельных точках отбора указывает на загрязнение илов, которое связано с подземным и поверхностным стоком.

Согласно распределению ТМ в почвенном покрове г. Несвижа [14], определены приоритетные в накоплении элементы: Pb, Cd, Cr и Zn. На основании пространственного распределения показателей Z_c прослежена закономерность в распределении нагрузок: центр – периферия, когда точки со значениями, соответствующими незагрязненным участкам, тяготеют к окраинам города, а показатели, соответствующие умеренно опасному и опасному уровню загрязнения, – к центральной части города. Установлено достоверное распределение Cr, Cu и Zn при разделении выборок данных в соответствии с функциональным зонированием.

На основании факторного анализа выявлены две ассоциации, а также идентифицированы техногенные источники, ответственные за их образование. Так, ассоциация по первому фактору (Ni–Cr–Cd) образована в результате эмиссии выбросов ТМ от дорожного транспорта и других передвижных источников, при этом распределение нагрузок от выбросов автотранспорта в пространстве города представлено более контрастно в диапазоне положительных и отрицательных значений, тяготеет к основным дорогам. Ассоциация по второму фактору (Cu–Zn–Pb) связана с непромышленными установками в жилом фонде, которые, в свою очередь, формируют менее контрастную нагрузку, при этом имеют выраженное площадное распространение. Анализ радиального распределения ТМ по профилю почвы позволил сделать вывод о роли загрязненных грунтов в качестве третьего значимого фактора в формировании техногенной нагрузки на почвенный покров города [14].

Характеристика района исследований. Район исследования приурочен к низменным ландшафтам речных долин, основной водной артерией которого является р. Уша – левый приток р. Нёман, с истоком у западной окраины д. Качановичи Несвижского района Минской области. В г. Несвиже и его окрестностях на р. Уше созданы речные (русловые) пруды. Систему прудов образуют сообщающиеся водоемы с перепадом высот в один метр: Дикий, Замковый, Бернардинцев, Девичий и Альбянский, созданные в XVI в. путем перегораживания русла р. Уши [15] (рис. 1).

Водосбор. Протяженность каскада Несвижских прудов составляет 6,5 км. Площадь водосборной территории – 17 км². Значительная ее часть приходится на городскую территорию (113, 5 га; 84 %). Поверхность водосборной территории представляет собой всхолмленную, сильнопересеченную равнину, характеризующуюся залесенностью, около 10 %, заболоченностью на уровне 4–11 % и распаханностью около 50 %.

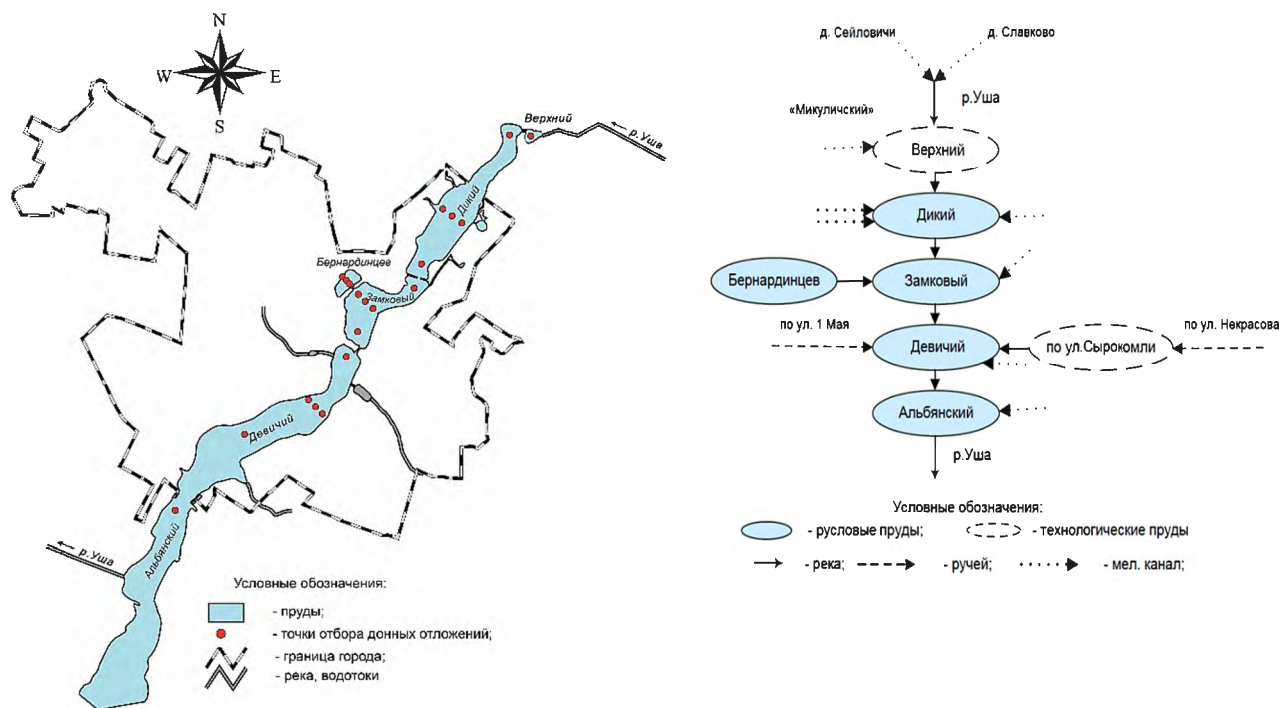


Рис. 1. Объект исследований – пруды г. Несвижа

Fig. 1. Object of the research – ponds of Nesvizh

Бассейн верхнего течения р. Уши находится в зоне сочленения Столбцовской моренной равнины и Копыльской конечно-моренной возвышенности. Согласно геоморфологической карте, в составе покровных отложений здесь преобладают моренные и конечно-моренные супеси и суглинки сожского оледенения (g,gtlls), перекрываемые на отдельных участках флювиогляциальными песками и супесями (fllsz^s). Выше города расположен крупный болотный массив «Каролино» площадью 2,1 тыс. га, северная его часть осушена и используется под пашню и сенокосы.

Почвы. Согласно созданной ретроспективной карте [16], естественный почвенный покров водосбора представлен:

- дерново-подзолистыми местами эродированными почвами преимущественно супесчаными на связных супесях, с глубины 0,4–1,0 м подстилаемыми моренными связными, реже рыхлыми песками или моренными суглинками;
- дерново-подзолистыми заболоченными преимущественно суглинистыми, реже супесчаными на легких пылеватых суглинках, местами с намытым верхом, реже на связных песчанисто пылеватых водно-ледниковых супесях, местами с намытым верхом, с глубины 0,3–0,9 м подстилаемые моренными суглинками, редко водно-ледниковыми рыхлыми песками.

Менее распространенными являются дерновые заболоченные почвы, представленные одной почвенной разновидностью, а также торфяно-болотные низинные почвы.

Аллювиальные отложения. В соответствии с основными литолого-геохимическими особенностями современных аллювиальных отложений Центральной провинции, к которой приурочен бассейн р. Уши, район исследований расположен в пределах Белорусской гряды и прилегающей к ней Копыльской возвышенности. Состоит он преимущественно из моренных и лёссовых отложений, находящихся в разнообразных сочетаниях с осадками флювиогляциального, болотного и другого генезиса. Значительное распространение имеют также торфяные накопления. Согласно геохимическому индексу, они характеризуются среднекарковыми концентрациями Cr (0,95), Cu (0,94), среди накапливающихся элементов – Ni (1,35) [5].

Основную нагрузку на водосбор формирует аэротехногенный фактор, обеспечиваемый выбросами от сжигания топлива; также важным фактором загрязнения городской среды является агротехногенный [14].

Методика. В ходе исследований были отобраны пробы донных отложений в русловых прудах города – Верхнем, Диком, Замковом, Бернардинцев, Девичьем и Альбянском – в количестве 37 шт. Основное внимание было сосредоточено на прудах, водосборы которых расположены преимущественно в пределах городских территорий. Точки отбора закладывались по поперечным профилям (1 проба в центральной части пруда и 2 пробы в прибрежных зонах), а также в верхних и приплотин-

ных частях водоемов (см. рис. 1). Отбор проб производили с лодки ручной драгой. Объединенную пробу донных отложений формировали из трех индивидуальных проб, отобранных на расстоянии 5–10 м друг от друга. Глубина отбора составляла 0–20 см. Донные отложения представлены илами, в разной степени обогащенными органическим веществом – от 4,2 до 30,7 %.

Анализ валового содержания химических элементов Cd, Zn, Pb, Cu, Ni и Cr в пробах донных отложений выполняли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии в аккредитованной лаборатории. Определение подвижных форм металлов проводили из вытяжки ацетатно-аммонийного буфера (pH 4,8). В пробах донных отложений также определяли pH и зольность в процентах к воздушно-сухому веществу.

Обработка данных включала вычисление статистических параметров; разделение многомерных данных на выборки по геохимическим параметрам; построение моделей пространственного отображения факторов (карты факторов); выделение ассоциаций химических элементов на основании многомерных статистических методов; выдвижение и проверку гипотез о связи конкретного техногенного фактора с выделяемой ассоциацией; интерпретацию полученных результатов [6, 17–21].

Статистическая обработка данных также включала вычисление основных параметров содержания микроэлементов в донных отложениях; среднее арифметическое; стандартное отклонение; непараметрический дисперсионный анализ Краскела – Уоллиса (Kruskal – Wallis Test).

Факторный анализ выполняли на основе корреляционной матрицы, методом главных компонент с последующим варимакс-вращением. Критическое значение уровня значимости принимали равным 5 %. Статистические анализы, проверку гипотез, построение картосхем осуществляли с использованием языка программирования R в среде Rstudio [17–20].

В качестве регионального геохимического фона ($C_{\text{пер.}}$) принимали результаты опробования донных отложений Березинского заповедника (БЗ) [9]. Критерием аномальности послужила минимально аномальная концентрация, рассчитываемая по формуле: $C_a \geq C + 3\sigma$ или $C_a \geq C + 3\epsilon$.

Для оценки эколого-геохимического состояния донных отложений использовали коэффициент аномальности (K_a), представляющий собой отношение содержания элемента в почве к фоновому значению ($C_{\text{пер.}}$), а также суммарный показатель загрязнения (Z_c), который также рассчитывали относительно фоновых значений ($C_{\text{пер.}}$) [6].

Для выделения техногенной составляющей в происхождении загрязнения использовали геоаккумуляционный индекс (Geo-accumulation Index), для которого выделяют семь классов (от 0-го до 6-го) с соответствующим уровнем загрязнения (от незагрязненных до экстремально загрязненных). Геоаккумуляционный индекс рассчитывали по формуле

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

где I_{geo} – геоаккумуляционный индекс; C_n – измеренная концентрация элемента; 1,5 – коэффициент, который минимизирует эффект от возможной вариации фона; B_n – фоновое содержание элемента [12]. Соответствие значения I_{geo} классу и уровню загрязнения донных отложений приведено в табл. 1.

Таблица 1. Градация геоаккумуляционного индекса и классификация уровней загрязнения

Table 1. Gradation of geoaccumulation index and classification of pollution levels

Значение I_{geo}	Класс I_{geo}	Уровень загрязнения донных отложений
Менее 0	0	Незагрязненные
0–1	1	Между незагрязненными и умеренно загрязненными
1–2	2	Умеренно загрязненные
2–3	3	Между умеренно и сильно загрязненными
3–4	4	Сильно загрязненные
4–5	5	Между сильно и экстремально загрязненными
Более 5	6	Экстремально загрязненные

Результаты и их обсуждение. Основные статистические параметры распределения исследуемых элементов в донных отложениях и почвах приведены в табл. 2. Выборки, характеризующие содержание всех исследуемых элементов в донных отложениях, согласно коэффициенту аномальности, являются однородными ($C_v < 33\%$). Обогащение донных отложений относительно почв исследуемого города составило: Cr – в 1,3 раза, Ni – в 1,2, Cu и Cd – в 1,1, при этом обогащения Zn и Pb не выявлено. При сравнении данных, характеризующих донные отложения, с нормированными величинами (ПДК/ОДК) установлено загрязнение Zn и Cd, при максимальных значениях 1,5 и 3,2 соответственно,

что также актуально для почв (3,7 и 2,7 соответственно). Обращает на себя внимание содержание Pb в донных отложениях, концентрации которого ниже фоновых значений в 2 раза, при этом 36 % проб почв загрязнены данным элементом (68,25; 5,4 ПДК) (см. табл. 2).

Таблица 2. Основные статистические параметры распределения тяжелых металлов в донных отложениях водоемов и почвах г. Несвижа

Table 2. Main statistical parameters of the distribution of heavy metals in bottom sediments of reservoirs and soils of Nesvizh

Показатель	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
Минимум	6,8 6,5	21,8 15,0	10,0 18,0	1,6 5,9	18,0 26,1	0,7 0,6
Максимум	14,7 15,5	43,9 43,2	20,2 171,7	22,8 174,8	80,5 203,3	1,6 1,4
Среднее, С	10,8 9,5	34,4 26,9	14,9 31,5	11,0 10,6	49,1 53,2	1,0 0,9
Стандартное отклонение σ	2,25 1,74	5,82 5,97	2,56 1,55	4,38 1,73	14,08 1,66	0,27 0,18
Коэффициент вариации C_v	0,20 18,37	0,18 22,23	0,17 68,25	0,39 168,04	0,30 65,07	0,26 19,07
Верхний предел аномальных значений	17,4 14,7	51,8 44,8	22,7 116,2	24,2 54,7	91,4 241,7	1,9 1,5
Встречаемость значений выше ПДК/ОДК, %	–	–	36	2	25 38	100 100
Максимальная кратность превышения ПДК/ОДК	–	–	5,4	5,3	1,5 3,7	3,2 2,7
Фактор обогащения*	1,2	1,3	0,5	1,1	0,9	1,1
ПДК/ОДК	20	100	32	33	55	0,5
Донные отложения в БЗ	12,0	12,0	20,0	15,0	31,0	0,5

* Отношение среднего содержания параметра в донных отложениях к среднему в почвах.

Примечание. В числителе приведены параметры, определенные для донных отложений, в знаменателе – для почв.

Коэффициент аномальности ($K_a > 1,0$) свидетельствует об обогащении донных отложений всеми элементами, за исключением Pb. Установлены уровни загрязнения согласно геоаккумулятивному индексу: для Cr и Cd – умеренно загрязненные, для Zn – между незагрязненными и умеренно загрязненными, для остальных – преимущественно незагрязненные. Таким образом, в соответствии с особенностями геохимической провинции уровень накопления Ni и Cu находится на уровне фоновых вариаций, а уровень накопления Cr, Cd и Zn – несколько выше и имеет техногенную природу (см. табл. 2, 3).

Таблица 3. Коэффициент аномальности и геоаккумулятивный индекс, рассчитанные для тяжелых металлов в донных отложениях водоемов г. Несвижа

Table 3. Pollution coefficient and geoaccumulative index calculated for heavy metals in bottom sediments of reservoirs in the city of Nesvizh

Показатель	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
<i>Коэффициент загрязнения</i>						
Для средних значений, $K_a = C / C_{\text{пер}}$	0,9	2,9	0,7	0,7	1,6	2,1
Для максимальных значений, $K_{a \text{ max}} = C_{\text{max}} / C_{\text{пер}}$	1,2	3,7	1,0	1,5	2,6	3,2
<i>Геоаккумуляционный индекс</i>						
Для средних значений, $I_{\text{geo}} = \frac{\log_2(C_n)}{1,5(B_n)}$	–0,3(0)	0,9(1)	–0,6(0)	–1,2(0)	0,0(1)	0,4(1)
Для максимальных значений	–0,8(0)	1,3(2)	–1,0(0)	0,0(1)	0,8(1)	1,1(2)

Примечание: светло-серым фоном выделены значения на уровне $I_{\text{geo}} = 1$, темно-серым фоном – $I_{\text{geo}} = 2$.

Для наглядного представления полученных результатов были сформированы геохимические ряды. Если порядок осредненных содержаний тяжелых металлов выразить некоторой условной последовательностью и представить в порядке убывания величин (мг/кг), то донные отложения г. Несвижа характеризует ряд $Zn_{49} Cr_{34} Pb_{15} Cu_{11} Ni_{11} Cd_{1,0}$; донные отложения фоновых территорий –

Zn₃₁ Pb₂₀ Cu₁₅ Cr₁₂ Ni₁₂ Cd_{0,5}; почвенный покров г. Несвижа – Zn₅₃ Pb₃₀ Cr₂₇ Cu₁₀ Ni₉ Cd_{0,9}. Данные последовательности демонстрируют близкие концентрации, не различающиеся между собой более чем в 2 раза (Cd, Pb, Cr).

Для отображения интенсивности обогащения донных отложений тяжелыми металлами в сравнении с фоновыми показателями использовали коэффициенты аномальности, рассчитанные на основании средних содержаний тяжелых металлов в донных отложениях г. Несвижа и выстроенные в порядке убывания: Cr_{2,9} Cd_{2,1} Zn_{1,6} Ni_{0,9} Cu_{0,7} Pb_{0,7}, а также максимальных значений – Cr_{3,7} Cd_{3,2} Zn_{2,6} Cu_{1,5} Ni_{1,2} Pb_{1,0}. Отмечается выраженная контрастность в интенсивности обогащения донных отложений Cr, Cd и Zn согласно средним и максимальным значениям – в 2–3 и 3–4 раза соответственно. Для сравнения приведен ряд, демонстрирующий интенсивность обогащения донных отложений г. Несвижа относительно его почв: Cr_{1,3} Ni_{1,2} Cd_{1,1} Cu_{1,1} Zn_{0,9} Pb_{0,5}.

Представленные ряды показывают обогащение донных отложений изучаемыми элементами в 2–4 раза, что, в основном, соответствует природным вариациям. Приоритетные по степени обогащения – Cr, Cd и Zn. Уровень накопления Ni обеспечен геохимической специализацией провинции, Pb находится на уровне фона и ниже.

Также рассчитывали коэффициент суммарного загрязнения Z_c , его значения изменялись от 2,6 до 6,3 ($Z_c < 10$), что указывает на низкие значения, отсутствие значимой дифференциации и слабый уровень техногенного загрязнения.

Таким образом, из широкого спектра инструментов, используемых для оценки донных отложений малого города с низкой техногенной нагрузкой, дифференциация выявлена на основании K_a . При этом значения K_a хорошо согласуются с I_{geo} (см. табл. 3), оба показателя демонстрируют поэлементную дифференциацию на уровне города, во многом повторяют порядок, характеризующий донные отложения Березинского заповедника и почвы г. Несвижа.

Выводы, сделанные для общей выборки данных, хорошо согласуются с результатами по отдельным прудам. Различия в содержаниях ТМ в донных отложениях прудов показаны на рис. 2, особенности обогащения представлены на рис. 3.

Таким образом, рис. 2 наглядно демонстрирует, что пространственное распределение данных, в целом, однородное, распределение ТМ в донных отложениях прудов существенно не различается.

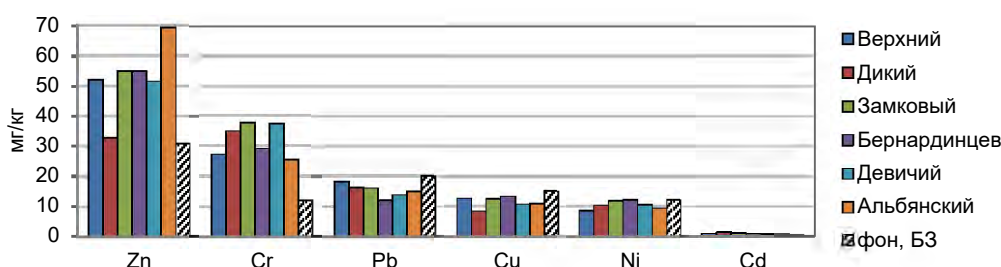


Рис. 2. Среднее содержание тяжелых металлов в донных отложениях русловых прудов г. Несвижа

Fig. 2. Average content of heavy metals in bottom sediments of riverbed ponds in Nesvzh

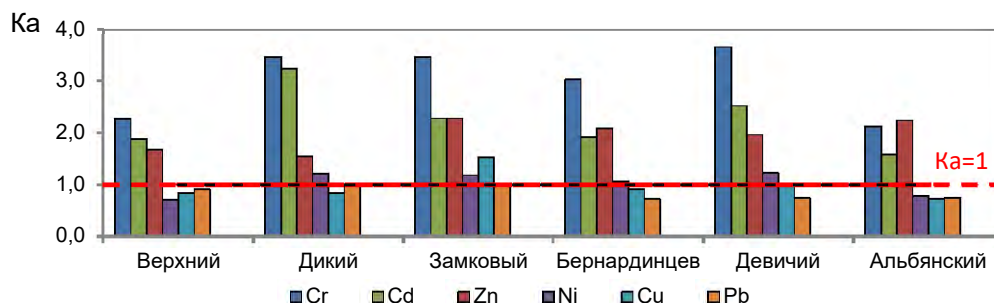


Рис. 3. Коэффициенты аномальности содержания донных отложений прудов г. Несвижа

Fig. Pollution coefficients of bottom sediments of ponds in Nesvzh

Оценку значимости различий в содержании ТМ по прудам проводили с помощью рангового дисперсионного анализа Краскела – Уоллиса (Kruskal – WallisTest) (табл. 4).

Таблица 4. Результаты рангового дисперсионного анализа Краскала – Уоллиса**Table 4. Results of the Kruskal – Wallis test**

Показатель	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
χ^2	2,4135	3,7964	7,4582	5,4772	8,6538	6,0741
df	3	3	3	3	3	3
p	0,4911	0,2843	0,05864	0,1400	0,03427	0,1081

Результаты теста свидетельствуют о том, что влияние группировки элементов по прудам статистически достоверно в отношении Zn ($p < 0,05$) (см. табл. 3) и, напротив, недостоверно для Ni, Cr, Pb, Cu, Cd. При этом, согласно [14], в почвенном покрове города распределение Zn, а также Cu и Cr было статистически достоверно.

Ввиду статистически недостоверных различий, выявленных при распределении большинства исследуемых элементов по прудам, были изучены нагрузки для каждой точки в отдельности и городской среды в целом.

Статистические параметры выборки и рассчитанные коэффициенты, выраженные через геохимические ряды, позволили выявить порядок накопления и определить приоритетные загрязняющие вещества. Корреляционный анализ содержаний элементов, выполняли для донных отложений и почв на территории города с целью оценки характера связей между исследуемыми компонентами.

Корреляционный анализ. Обобщенная корреляционная матрица, рассчитанная по совокупности данных, характеризующих донные отложения ($n = 20$), приведенная на рис. 4, а показывает, что значимые корреляционные связи образует Cu (с Zn), а также Ni (с Zn, Cu и Cr), что характерно и для почв (рис. 4, б). Сильные связи характерны для пар: Cu–Zn, средние – для Zn–Ni–Cu и Ni–Cr. При этом, Pb и Cd не образуют значимых корреляционных связей (см. рис. 4, а).

	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn
Cr	0,51				
Pb	0,15	0,27			
Cu	0,57	0,17	0,23		
Zn	0,62	0,17	0,16	0,81	
Cd	0,16	0,13	0,45	0,30	0,27

а (a)

	Ni	Cr	Pb	Cu	Zn
Cr	0,88				
Pb	0,30	0,22			
Cu	0,55	0,58	0,58		
Zn	0,50	0,52	0,47	0,84	
Cd	0,71	0,59	0,25	0,54	0,54

б (b)

Рис. 4. Корреляционные матрицы содержания микроэлементов в донных отложениях (а) и почвах (б). Фоном выделены значимые корреляционные связи, полужирным шрифтом – наиболее значимые из них

Fig. 4. Correlation matrices of trace element content in bottom sediments (a) and soils (b). Significant correlations are highlighted in background, the most significant ones are in bold

Согласно [14] рис. 4, б для почвенного покрова г. Несвижа характерно наличие двух устойчивых ассоциаций коррелирующих между собой элементов, обе из которых обусловлены длительным техногенным воздействием: Ni–Cr–Cd и Cu–Zn–Pb. Показано [14], что обе ассоциации формируются при осаждении выбросов автотранспорта и теплоэнергетических установок, в данном случае котельных. При изучении корреляционной матрицы донных отложений очевидно, что связи в парах Cu–Zn и Ni–Cr также значимы.

Факторный анализ был выполнен для проверки гипотезы о двух наиболее значимых факторах в числе основных, а также выявления их вклада в формирование ассоциаций химических элементов в донных отложениях водоемов г. Несвижа. В результате были выделены две главные компоненты (главных фактора), на долю которых приходится более 70 % суммарной дисперсии, что демонстрирует матрица факторных нагрузок (табл. 5). Также для сравнения приведена матрица, отражающая распределение нагрузок, характеризующих почвы.

Первая главная компонента (фактор 1) (см. табл. 4) отражает общую закономерность распределения элементов в донных отложениях города. Вторая главная компонента (фактор 2) уточняет общие закономерности с учетом особенностей распределения отдельных элементов. Так, фактор 1, предоставляющий наибольший вклад в общую дисперсию – 44,1 %, указывает на ассоциацию Cu–Zn–Ni. Фактор 2 вносит в дисперсию 28,6 % и представляет ассоциацию Cd–Pb.

Таблица 5. Матрицы значений факторных нагрузок главных компонент, описывающие различия распределения элементов в донных отложениях и почвах**Table 5. Matrices of factor loadings of the principal components, describing differences in the distribution of elements in bottom sediments and soils**

Донные отложения							Почвы						
Фактор/ вклад, %	Ni	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn	Фактор/ вклад, %	Ni	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn
1 / 44,1	0,61*	–	–	–	0,91	0,84	1 / 62,3	0,97	0,83	0,65	–	–	–
2 / 28,6	–	–	0,92	0,55	–	–	2 / 18,0	–	–	–	0,56	0,94	0,77

* Фоном выделены ведущие компоненты для каждой переменной; нагрузки, не являющиеся достоверными, опущены.

Геохимический смысл выделения двух ассоциаций и обоснованность выводов подтверждают данные по выбросам ТМ на территории Беларуси от автотранспорта и непромышленных установок в жилом фонде (рис. 5).

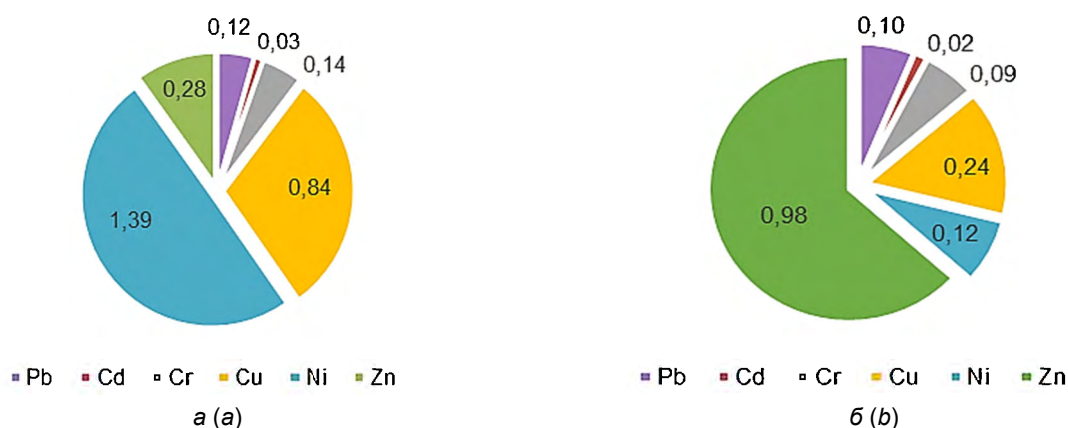


Рис. 5. Объемы выбросов тяжелых металлов на территории Беларуси, т: а – от дорожного транспорта и других передвижных источников; б – от непромышленных установок в жилом фонде (2018 г.) [10]

Fig. 5. Volumes of heavy metal emissions on the territory of Belarus, t: a – from road transport and other mobile sources; b – from non-industrial installations in the housing stock (2018) [10]

Так, *фактор 1*, предоставляющий наибольший вклад в общую дисперсию (44,1 %), указывает на ассоциацию Cu–Zn–Ni. На долю компонентов данной ассоциации приходится 87 % (1,34 т) и 90 % (2,51 т) от суммарных объемов выбросов от основных источников воздействия: от непромышленных установок для сжигания в жилом фонде и от дорожного транспорта и передвижных источников соответственно. Согласно [14], значимая нагрузка на Cu и Zn, а также сильная корреляционная связь между компонентами, в большей степени указывает на непромышленные установки для сжигания в жилом фонде как источников техногенного воздействия в г. Несвиже. И хотя в настоящее время используется преимущественно газовое отопление, тем не менее длительное воздействие продуктов горения на почвенный покров города остается значимым фактором, формирующим актуальную техногенную нагрузку на донные отложения.

Коэффициент ранговой корреляции использовали в качестве показателя оценки тесноты связи и отражения зависимости вариации результирующего признака от вариации признака-фактора. Так, в качестве результирующего признака определяли зависимость вариации зольности от вариации признака фактора 1. Качественную характеристику тесноты связи коэффициента ранговой корреляции оценивали по шкале Чеддока. В результате была установлена заметная прямая корреляционная связь между фактором 1 и содержанием органического вещества в донных отложениях ($r = 0,56$, $p < 0,012$) (рис. 6, а).

Геохимический смысл результата применения коэффициента ранговой корреляции можно интерпретировать следующим образом: концентрация элементов ассоциации Cu–Zn–Ni предопределяется содержанием органического вещества. При повышении зольности в диапазоне от 75 до 96 % наблюдается положительная связь между фактором 1 и зольностью (см. рис. 6, а).

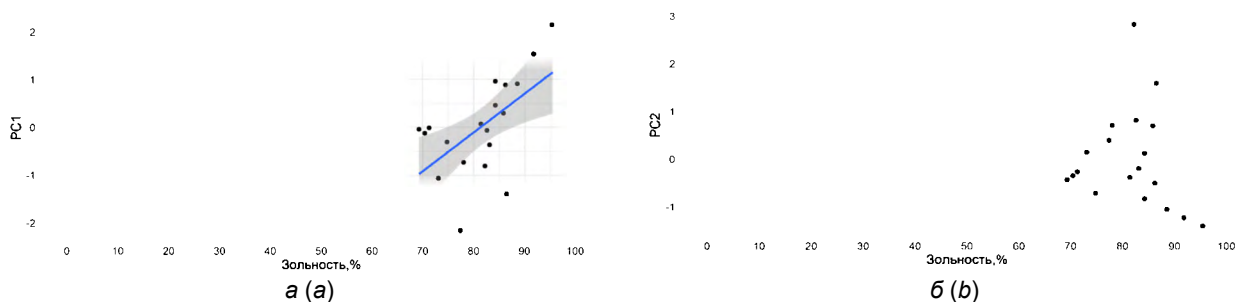


Рис. 6. Зависимость факторов 1 (PC1) (а) и 2 (PC2) (б) от зольности донных отложений

Fig. 6. Dependence of factors 1 (PC1) (a) and 2 (PC2) (b) on ash content of bottom sediments

В табл. 6 представлены данные о распределении показателя зольности по прудам. Показано, что средние показатели по прудам находятся на уровне фоновых. Наибольшей зольностью характеризуются донные отложения пруда Дикого, принимающего воды мелиоративных каналов с осушенного болотного массива, а также поверхностный сток с водосбора, в пределах которого распространены преимущественно торфяно-болотные почвы. Следовательно, положительная связь между фактором 1 и зольностью характерна в большей мере для прудов Дикого, а также Девичьего и Альбянского, в меньшей степени – для Замкового и не проявляется для Бернардинцев (зольность >75 %).

Таблица 6. Зольность в донных отложениях водоемов г. Несвижа, %

Table 6. Ash content in bottom sediments of reservoirs in Nesvizh, %

Пруд	Диапазон (среднее значение) зольности, %	Пруд	Диапазон (среднее значение) зольности, %
Верхний	–	Девичий	77,3–90,6 (82,3)
Дикий	81,4–95,8 (88,0)	Альбянский	86,5
Замковый	69,3–86,9 (81,2)	Все пруды	69,3–95,8 (83,4)
Бернардинцев	70,4–73,1 (71,6)	Донные отложения, БЗ	84,0

Фактор 2 вносит 28,6 % в общую дисперсию и демонстрирует вторую ассоциацию Cd–Pb. На долю этих компонентов приходится 5–8 % (0,12–0,15 т) в объеме выбросов от основных источников загрязнения (см. рис. 5). Значимой связи между фактором 2 и зольностью не установлено (рис. 6, б).

Уровень накопления элементов данной ассоциации в почвах, а также выявленная ранее связь их с выбросами [14] позволяют акцентировать внимание на техногенной природе поступления Cd и Pb в окружающую среду изучаемого города. Помимо вымывания из почв, в пруды Cd может поступать со стоком с сельскохозяйственных угодий, а также в результате разложения различных организмов и водной растительности.

Обращает на себя внимание тот факт, что Cd и Pb характеризуются наибольшей подвижностью среди изучаемых элементов донных отложений водоемов исследуемого города: 62,4–97,6 и 39,0–93,2 % соответственно (рис. 7).

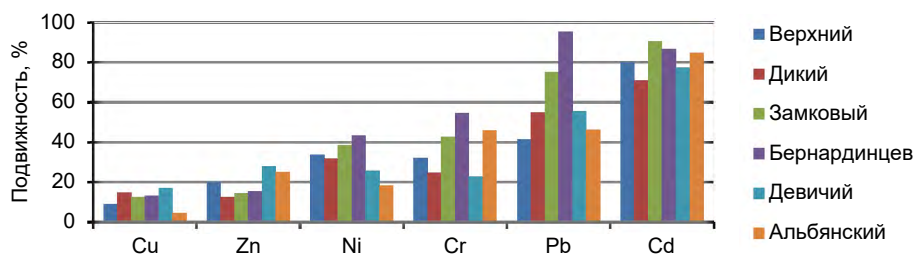


Рис. 7. Подвижность тяжелых металлов в донных отложениях водоемов г. Несвижа

Fig. 7. Mobility of heavy metals in bottom sediments of reservoirs in Nesvizh

Согласно [22], в незагрязненной почве, на долю фракции, связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, приходится 31,7 % Cd и 37,6 % Pb от общего их содержания. По мере роста уровня загрязнения наблюдается интенсивное накопление Cd (до 72,9 %) и Pb (до 82–88 %) в данной фракции. Кроме того, отмечается, что роль органического вещества в связывании Cd в загрязненной почве невелика (0,9–1,9 %).

Таким образом, высокий показатель подвижности Cd и Pb, характеризующий донные отложения прудов изучаемого города на фоне очевидной техногенной природы поступления данных элементов, может указывать на аккумуляцию Cd и Pb в донных отложениях, связанную с процессами соосаждения металлов с гидроксидами железа и марганца.

По результатам проведения факторного анализа были выполнены боксплоты (рис. 8), наглядно отображающие масштабы варьирования выделенных факторов в донных отложениях г. Несвижа, а также картосхемы, отражающие пространственное распределение нагрузки раздельно по двум факторам в разрезе точек опробования (рис. 9).

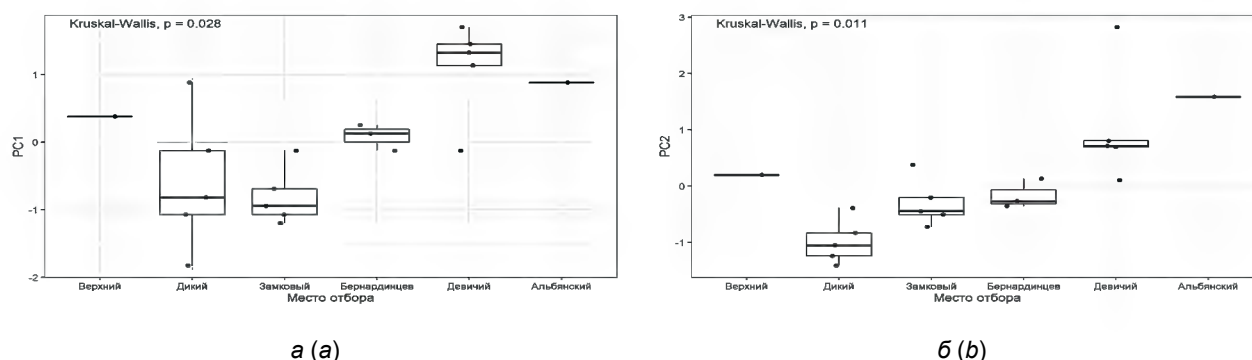


Рис. 8. Масштабы варьирования факторов 1 (PC1) (а) и 2 (PC2) (б) в донных отложениях водоемов г. Несвижа

Fig. 8. The scale of variation of factors 1 (PC1) (a) and 2 (PC2) (b) in bottom sediments of reservoirs in the city of Nesvizh

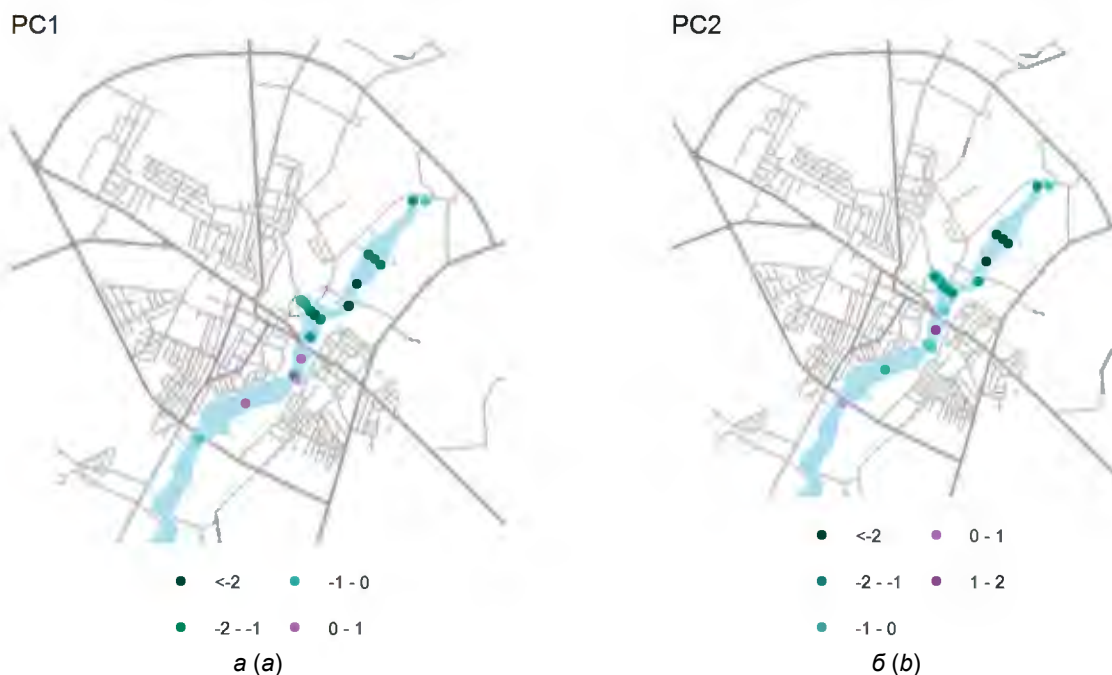


Рис. 9. Картосхемы распределения факторных нагрузок в донных отложениях при формировании ассоциаций с учетом преобладающей роли факторов 1 (а) и 2 (б)

Fig. 9. Maps of the distribution of factor loads in bottom sediments during the formation of associations, taking into account the predominant role of factors 1 (a) and 2 (b)

При интерпретации полученных данных (см. рис. 8, 9) отрицательные значения воспринимались как точки с низкой нагрузкой фактора, имеющие тенденцию к уменьшению (от 0 до ≤ -2), а также положительные – как имеющие наиболее значимую нагрузку, при тенденции к увеличению (от 0 до ≥ 2).

Наименьшее значение факторов в обоих случаях (см. рис. 7), характеризуемых наименьшей нагрузкой, были характерны для прудов Дикого и Замкового. Это закономерно, принимая в расчет, с одной стороны, техногенную природу обоих ассоциаций, а с другой – отсутствие выраженной техногенной нагрузки на водосборы данных прудов, занятые преимущественно парками [6, 23]. Типичная же нагрузка урбанизированного пространства малого города представлена на водосборе пруда Девичьего, что нашло отражение в наибольших положительных, и вместе с тем наиболее выраженных нагрузках на оба фактора.

Водосбор, как и сам пруд Бернардинцев, занимают наименьшую площадь, находясь в городе, наполняются водами пруда Дикого и водами канала с мелиорированных территорий, расположенных выше города. Техногенная нагрузка проявляется положительно по первому фактору.

Таким образом, использование факторного анализа позволило не только выявить, но и оценить вклад каждого фактора в формирование нагрузки как для отдельно взятой точки, так и для пруда в целом, а также представить полученные результаты в пространственном распределении на территории города.

Выводы.

1. Выявлено обогащение донных отложений водоемов г. Несвижа Cr, Cd и Zn в 2–4 раза относительно фоновых значений. Выше допустимых уровней (по отношению к гигиеническим нормативам для почв) донные отложения загрязнены Cd и Zn – в 100 и 38 % случаев соответственно. В свою очередь, содержание Ni, Cu и Pb находится на уровне природных вариаций.

2. Установлено обогащение донных отложений относительно почв исследуемого города: Cr – в 1,3 раза, Ni – в 1,2, Cu и Cd – в 1,1 раза, при этом обогащения Zn и Pb – не выявлено.

3. С использованием корреляционного анализа в донных отложениях г. Несвижа выявлены сильные положительные корреляционные связи Cu с Zn, а также средние положительные связи Ni с Zn, при этом Cu и Cr, Pb и Cd не образуют значимых корреляционных связей. Необходимо отметить, что связи Cu–Zn и Ni–Cr также были оценены как значимо положительные для почв города.

4. Посредством применения факторного анализа определены наиболее вероятные источники поступления ТМ в донные отложения водоемов г. Несвижа.

5. Таким образом, если на основании применения геохимических коэффициентов был выявлен лишь спектр элементов, характеризуемых некоторым обогащением в условиях малого города с низкой техногенной нагрузкой, то применение непараметрических методов позволило определить устойчивые ассоциации, образованные технофильными элементами в донных отложениях водоемов (Cu–Zn–Ni и Cd–Pb) и проследить их связь с источником – воздействием определенных аэро-техногенных факторов (выбросов от непромышленных установок для сжигания в жилом фонде и от дорожного транспорта и передвижных источников); выявить и оценить связи между компонентами выделенных ассоциаций, а также определить предопределяющие в накоплении факторы (связь PC1 с зольностью), а также предположить связь PC2 с содержанием глинистой фракции.

6. Выявлены также особенности распределения Zn в окружающей среде малого города. Выборка данного ТМ характеризуется достоверным распределением Zn в донных отложениях. Отмечено также образование сильных корреляционных связей данного компонента в формировании ассоциаций как в донных отложениях, так и в почвах. Полученный результат согласуется с представлениями о распределении Zn в городах [24], а также с представлениями о поведении Zn в речных донных осадках согласно выделенным техногеохимическим ореолам [5], где именно Zn является характерным технофильным ТМ, отличительно характеризующим среду малого города.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность за профессиональные консультации научному руководителю доктору географических наук В. С. Хомичу и кандидату геолого-минералогических наук С. В. Савченко, благодарит кандидата географических наук В. А. Рыжикова за помощь в проведении полевых исследований и кандидата географических наук О. Ю. Круковскую за помощь в интерпретации и представлении геохимических данных с использованием языка программирования R

Acknowledgments. The author expresses her sincere gratitude to the supervisor, Dr. Sc. (Geography) V. S. Khomich, Ph. D. (Geology and Mineralogy) S.V. Savchenko for the professional advices, and also thanks to Ph. D. (Geography) V. A. Ryzhikov for his help in conducting field research and Ph. D. (Geography) O. Yu. Krukowskaya for the help in interpreting and presenting geochemical data using the R programming language.

Список используемых источников

1. Кузнецов, В. А. Геохимия аллювиального литогенеза / В. А. Кузнецов. – Минск : Наука и техника, 1973. – 276 с.
2. Кузнецов, В. А. Геохимия речных долин (научные и прикладные аспекты исследований) / В. А. Кузнецов. – Минск : Наука и техника, 1986. – 304 с.
3. Страхов, Н. М. Типы литогенеза и их эволюция в истории земли / Н. М. Страхов. – М. : Госгеолтехиздат, 1963. – 535 с.
4. Перельман, А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман, Н. С. Касимов. – М. : Астрей-2000, 1999. – 610 с.
5. Геохимические провинции покровных отложений БССР / под ред. К. И. Лукашёва. – Минск : Наука и техника, 1969. – 470 с.
6. Лукашёв В. К., Окунь Л. В. Загрязнение тяжелыми металлами окружающей среды г. Минска / В. К. Лукашёв, Л. В. Окунь. – Минск : Институт геологических наук АН Белоруссии, 1996. – 80 с.
7. Саёт, Ю. Е. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Саёт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин. – М. : Недра, 1990. – 335 с.
8. Янин, Е. П. Поверхностный сток с городских территорий как источник загрязнения речных систем / Е. П. Янин // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 2007. – № 4. – С. 2–104.
9. Натаров, В. М. Комплексный геохимический фоновый мониторинг в Березинском биосферном заповеднике / В. М. Натаров, О. В. Лукашёв, В. В. Савченко. – Минск : Белорус. Дом печати, 2013. – 213 с.
10. Савченко, В. В. Литофациальная дифференциация химических элементов в отложениях речных долин в природных и техногенных условиях // Водные ресурсы. – 1996. – Т. 23, № 6. – С. 690–698.
11. Ассоциации химических элементов в природных компонентах на территории Березинского биосферного заповедника / О. В. Лукашёв [и др.] // Природопользование. – Минск, 2014. – Вып. 25. – С. 115–123.
12. Методические подходы к оценке загрязнения донных отложений реки тяжелыми металлами (на примере р. Свислочи) / Е. П. Овчарова [и др.] // Природопользование. – Минск, 2016. – Вып. 30. – С. 50–59.
13. Романкевич, Ю. А. Комплексная эколого-геохимическая оценка состояния водных объектов малого города Беларуси (на примере г. Несвижа) // Природопользование. – Минск, 2015. – Вып. 27. – С. 85–94.
14. Романкевич, Ю. А. Распределение тяжелых металлов по территории г. Несвижа // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 56–70.
15. Кирвель, И. И. Пруды Беларуси как антропогенные водные объекты, их обслуживание и режим / И. И. Кирвель. – Минск : Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, 2005. – 234 с.
16. Романкевич, Ю. А. Ретроспективная карта почвенного покрова г. Несвижа (Беларусь) для изучения трансформации городских почв / Ю. А. Романкевич // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXI Междунар. симп. им. акад. М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 130-летию со дня рожд. проф. М. И. Кучина / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – Т. I. – С. 812–813.
17. Лукашёв, О. В. Ретроспективная оценка загрязнения почв и растительности г. Кобрин металлами / О. В. Лукашёв, Н. В. Жуковская // Природные ресурсы. – 2009. – № 1 – С. 15–21.
18. Зинкуте, Р. Факторный анализ при выделении ассоциаций и методические разработки подсчета геохимического фона / Р. Зинкуте // Природные ресурсы. – 1999. – № 4. – С. 97–108.
19. Савельев, А. А. Использование языка R для статистической обработки данных / А. А. Савельев, С. С. Мухарамова, А. Г. Пилюгин. – Казань : Казанский государственный университет, 2007. – 29 с.
20. Многомерное отображение структуры региональных геохимических полей (факторный анализ) / А. В. Кирюшин [и др.] // Изв. РАН. Сер. геогр. – 1996. – № 4. – С. 24–45.
21. Тютюнник, Ю. Г. Факторный анализ геохимических особенностей почв городов Украины / Ю. Г. Тютюнник, Б. А. Горлицкий // Почвоведение. – 1998. – № 1. – С. 100–109.
22. Головатый, С. Е. Тяжелые металлы в агроэкосистемах / С. Е. Головатый. – Минск : Институт почвоведения и агрохимии, 2002. – С. 239.
23. Кадацкая, О. В. Геохимическая индикация ландшафтной обстановки водосборов / О. В. Кадацкая. – Минск : Наука и техника, 1987. – 134 с.
24. Хомич, В. С. Цинк в почвах городов Белоруссии / В. С. Хомич, Т. И. Кухарчик, С. В. Какарека // Почвоведение. – 2004. – № 4. – С. 430–439.

References

1. Kuznecov B. A. *Geokhimiya allyuvial'nogo litogeneza* [Geochemistry of alluvial lithogenesis]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1973, 276 p. (in Russian)
2. Kuznecov B. A. *Geokhimiya rechnyh dolin (nauchnye i prikladnye aspekty issledovaniy)* [Geochemistry of river valleys (scientific and applied aspects of research)]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1986, 303 p. (in Russian)
3. Strahov N. M. *Tipy litogeneza i ih evolyuciya v istorii zemli* [Types of lithogenesis and their evolution in the history of the earth]. Moscow, State Geological Technical Publ., 1963, 535 p. (in Russian)
4. Perelman A. I., Kasimov N. S. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, Astreya-2000, 1999, 610 p. (in Russian)
5. Lukashyov K. I. (ed.) *Geokhimicheskie provincii pokrovnyh otlozhenij BSSR* [Geochemical provinces of the cover deposits of the BSSR]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1969, 473 p. (in Russian)

6. Lukashev V. K., Okun L. V. *Zagryazneniye tyazhelymi metallami okruzhayushchey sredy g. Minska* [Heavy metal pollution of the environment in Minsk]. Minsk, Institute of Geological Sciences of the Academy of Sciences of Belarus, 1996, 80 p. (in Russian)
7. Sayet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 335 p. (in Russian)
8. Yanin E. P. *Poverhnostnyy stok s gorodskih territorij kak istochnik zagryazneniya rechnyh sistem* [Surface runoff from urban areas as a source of pollution of river systems]. *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty ohrany okruzhayushchey sredy = Scientific and technical aspects of environmental protection*, 2007, no. 4, pp. 2–104. (in Russian)
9. Natarov V. M., Lukashyov O. V., Savchenko V. V. *Kompleksnyy geohimicheskij fonovyy monitoring v Berezinskom biosfernom zapovednike* [Integrated geochemical background monitoring in the Berezinsky Biosphere Reserve]. Minsk, Belarus. Dom pechati Publ., 2013, 213 p. (in Russian)
10. Savchenko V. V. *Litofacial'naya differenciatsiya himicheskikh elementov v otlozheniyah rechnyh dolin v prirodnykh i tekhnogennykh usloviyakh* [Lithofacies differentiation of chemical elements in sediments of river valleys under natural and technogenic conditions]. *Vodnye resursy = Water resources*, 1996, vol. 23, no. 6, pp. 690–698. (in Russian)
11. Lukashev O. V. *Assotsiatsii khimicheskikh elementov v prirodnykh komponentakh na territorii Berezinskogo biosferного zapovednika* [Associations of chemical elements in natural components on the territory of the Berezinsky Biosphere Reserve]. *Prirodopolzovaniye = Nature Management*, 2014, no. 25, pp. 115–123. (in Russian)
12. Ovcharova E. P., Homich V. S., Kadackaya O. V., Sanec E. V., Sarkar S. K., Dashkevich M. M., Tishchikov I. G. *Metodicheskie podhody k ocenke zagryazneniya donnykh otlozhenij reki tyazhelymi metallami (na primere r. Svisloch)* [Methodological approaches to assessing the pollution of river bottom sediments with heavy metals (using the example of the Svisloch River)]. *Prirodopolzovaniye = Nature Management*, 2016, no. 30, pp. 50–59. (in Russian)
13. Romankevich Yu. A. *Kompleksnaya ekologo-geohimicheskaya ocenka sostoyaniya vodnykh ob'ektov malogo goroda Belarusi (na primere g. Nesvizha)* [Comprehensive ecological and geochemical assessment of the state of water bodies of a small town in Belarus (using the example of the city of Nesvizh)]. *Prirodopolzovaniye = Nature Management*, 2015, no. 27, pp. 85–94. (in Russian)
14. Romankevich Yu. A. *Raspredelenie tyazhelykh metallov po territorii g. Nesvizha* [Distribution of heavy metals across the territory of Nesvizh]. *Prirodopolzovaniye = Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 56–70. (in Russian)
15. Kirvel' I. I. *Prudy Belarusi kak antropogennyye vodnye ob'ekty, ih obsluzhivanie i rezhim* [Ponds of Belarus as anthropogenic water bodies, their maintenance and regime]. Minsk, Maxim Tank Belarusian State Pedagogical University Publ., 2005, 234 p. (in Russian)
16. Romankevich Yu. A. *Retrospektivnaya karta pochvennogo pokrova g. Nesvizha (Belarus') dlya izucheniya transformatsii gorodskih pochv* [A retrospective map of the soil cover of the city of Nesvizh (Belarus) for studying the transformation of urban soils]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy Mezhdunar. simpoz.* [Proc. of the int. symp. "Problems of geology and subsoil development"]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2017, vol. 2, pp. 812–813. (in Russian)
17. Lukashev O. V., Zhukovskaya N. V. *Retrospektivnaya otsenka zagryazneniya pochv i rastitelnosti g. Kobrina metallami* [Retrospective assessment of contamination of soils and vegetation in the city of Kobrin with metals]. *Prir. Resursy = Natural Resources*, 2009, no. 1, pp. 15–21. (in Russian)
18. Zinkute R. *Faktornyy analiz pri vydelenii assotsiatsiy i metodicheskiye razrabotki podscheta geokhimicheskogo fona* [Factor analysis in identifying associations and methodological developments for calculating the geochemical background]. *Prirodnyye resursy = Natural Resources*, 1999, no. 4, pp. 97–108. (in Russian)
19. Savelyev A. A., Mukharamova C. C., Pilyugin A. G. *Ispolzovaniye yazyka R dlya statisticheskoy obrabotki dannykh* [Using the R Language for Statistical Data Processing]. Kazan, Kazan State University, 2007, 29 p. (in Russian)
20. *Mnogomernoye otobrazheniye struktury regionalnykh geokhimicheskikh poley (faktornyy analiz)*. [Multidimensional mapping of the structure of regional geochemical fields (factorial analysis)]. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Proc. of the RAS. Geographic series*, 1996, no. 4, pp. 24–45. (in Russian)
21. Tyutyunnik Yu. G. *Faktornyy analiz geokhimicheskikh osobennostey pochv gorodov Ukrainy* [Factor analysis of geochemical features of soils in Ukrainian cities]. *Pochvovedeniye = Soil Science*, 1998, no. 1, pp. 100–109. (in Russian)
22. Golovatyj S. E. *Tyazhelye metally v agroekosistemah* [Heavy metals in agroecosystems]. Minsk, 2002, 239 p. (in Russian)
23. Kadackaya O. V. *Geohimicheskaya indikatsiya landshaftnoj obstanovki* [Geochemical indication of the landscape conditions of watersheds]. Minsk, Nauka i Technika Publ., 1987, 134 p. (in Russian)
24. Homich V. S., Kuharchik T. I., Kakareka S. V. *Cink v pochvakh gorodov Belorussii* [Zinc in the soils of Belarusian cities]. *Pochvovedeniye = Soil Science*, 2004, no. 4, pp. 30–439. (in Russian)

Информация об авторе

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

Information about the author

Julia A. Ramankevich – Researcher, Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220014, Minsk, Belarus). E-mail: yulia_romankevich@mail.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-98-106>
УДК [631.4:502.175](476)

Поступила в редакцию 01.12.2023
Received 01.12.2023

О МЕТОДАХ ИЗУЧЕНИЯ И ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ В БЕЛАРУСИ

В. С. Хомич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Анализируются методические аспекты изучения, мониторинга почв и почвенно-геохимических изысканий в части подходов и методов оценки загрязнения почв с целью выявления различий и несогласованности в технических нормативно-правовых актах (ТНПА), регламентирующих указанные работы. Анализ проводится на основе действующих в Беларуси ТНПА и литературных источников с учетом опыта проведения научных исследований, локального мониторинга почв и инженерно-геоэкологических изысканий. Показаны нестыковки и противоречия в действующих ТНПА в части сети отбора проб, размеров пробных площадок, глубины отбора, нормативов качества почвы. Обосновываются необходимость совершенствования нормативно-методического обеспечения изучения и оценки загрязнения почв в направлениях дифференциации гигиенических нормативов концентраций химических веществ в почвах в зависимости от категорий и видов использования земель; унификации методических подходов изучения и оценки загрязнения почв при мониторинге, контроле загрязнения почв, инженерно-геоэкологических изысканиях; более четкого регламентирования размеров пробных площадок и плотности сети отбора в зависимости от цели изучения и оценки загрязнения почв.

Ключевые слова: почвы; мониторинг; геоэкологические изыскания; методика; пробная площадка; сеть отбора; нормативы; оценка загрязнения.

Для цитирования. Хомич В. С. О методах изучения и оценки загрязнения почв в Беларуси // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 98–106.

ON THE STUDYING METHODS AND ASSESSMENT OF SOIL POLLUTION IN BELARUS

V. S. Khomich

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

Abstract. The methodological aspects of study, soil monitoring and soil-geochemical research are analyzed from the point of view of approaches and methods for soil pollution assessment in order to identify differences and inconsistencies in the technical regulatory legal acts (TRLA) regulating these works. The analysis is carried out on the basis of TRLA valid in Belarus and literary sources, taking into account the experience in scientific researches, local soil monitoring and engineering-geoecological surveys. The inconsistencies and contradictions of the current TRLA in terms of the sampling network, the sampling sites size, sampling depth and soil quality standards are shown. The necessity of improving of the normative and methodological support for soil pollution study and assessment in terms of hygienic standards differentiation for chemicals concentrations in soils, depending on the categories and types of land use; the methodological approach unification of soil pollution study and assessment during the monitoring, soil pollution control and engineering-geoecological surveys; more precise regulation of the sample sites size and the sampling network density, depending on the purpose of soil pollution study and assessment are explained.

Keywords: soils; monitoring; geoecological surveys; methodology; sampling site; sampling network; standards; pollution assessment.

For citation. Khomich V. S. On the studying methods and assessment of soil pollution in Belarus. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 98–106.

Введение. В обеспечении экологически комфортного состояния городской среды значительная роль принадлежит почвенному покрову, который в условиях города выполняет ряд специфических экологических функций. Одним из инструментов сохранения почвенного плодородия и экологической чистоты почвенного покрова является проведение оценки химического загрязнения почв и реализация мероприятий, разработанных по ее результатам. Поэтому адекватность указанной оценки реальному состоянию почвы является одним из важнейших условий экологобезопасного обращения с почвами.

Оценка загрязнения почв проводится, главным образом, при эколого-геохимических и почвенно-геохимических исследованиях [1, 2 и др.], мониторинге почв населенных пунктов [3, 4], локальном мониторинге почв [5], контроле загрязнения почв [4], гигиенической оценке качества почвы населенных мест [6], агрохимическом обследовании почв сельскохозяйственных земель [7], инженерно-геоэкологических изысканиях [8].

Перечисленные виды исследований (мониторинга, изысканий и т. д.) регламентируются специальными ТНПА, в которых прописываются цели и задачи исследований почв, плотность сети опробования, размеры пробных площадок, методы отбора проб, методы оценки загрязнения почвы и др.

Несмотря на общую цель перечисленных видов исследований почв – обеспечение экологической чистоты и безопасности почвенного покрова, практика использования регламентирующих их ТНПА показала наличие существенных различий, иногда противоречий, приводящих к неоднозначности результатов оценки химического загрязнения почв. А это важно при принятии решений по рациональному использованию почв, разработке мероприятий по обращению с почвами в случае их загрязнения и др.

При исследованиях (мониторинге, изысканиях и др.) и оценке загрязнения почв чаще других возникают вопросы (коллизии) в отношении выбора фона, плотности сети отбора проб, размеров пробных площадок, глубины отбора, перечней определяемых химических веществ, нормативов качества почвы. Эти и другие вопросы, возникающие на различных этапах проведения работ по оценке загрязнения почв, анализируются в данной статье на основе действующих ТНПА, литературных источников, многочисленных отчетных материалов по результатам почвенно-геохимических изысканий и оценки загрязнения почв, собственного опыта изучения и загрязнения почв.

Выбор фона. Существует несколько подходов к выбору фоновой территории в зависимости от целей оценивания состояния/загрязнения почв. Различают, прежде всего, природный и природно-антропогенный фон [9, 10].

Природный фон – содержание химического вещества на близких к естественным, слабонарушенным территориях, удаленных от техногенных источников. При этом может быть рассчитан природный фон для Беларуси в целом, региональный фон (для административной области) и местный – по данным близ расположенной особо охраняемой природной территории или специальных исследований ландшафтов-аналогов.

В научных исследованиях, при мониторинге почв городов, геоэкологических изысканиях и других мероприятий в качестве фона наиболее целесообразно использовать результаты мониторинга загрязнения земель на фоновых территориях, осуществляемого в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС). Мониторинг проводится на близких к естественным, слабонарушенным территориях, удаленных от техногенных источников. Всего на территории Беларуси насчитывается 90 пунктов наблюдений фонового мониторинга – по 15 в каждой из областей [11]. Наблюдения проводятся последовательно на трех пунктах в каждой области ежегодно. Фоновые значения содержания химических веществ за отчетный год и предыдущий период в среднем для территории Беларуси публикуются на сайте Главного информационно-аналитического центра НСМОС (nsmos.by). Представляется целесообразным публиковать также средние фоновые значения в разрезе административных областей за последний 5-летний период, которые будут отражать актуальный региональный фон для каждой области и являться более репрезентативными для использования в практической деятельности и для исследований (табл. 1).

Таблица 1. Среднее содержание химических веществ в почвах пунктов наблюдений на фоновых территориях в разрезе административных областей и Беларуси в целом (2018–2022 гг.), мг/кг (по данным НСМОС)

Table 1. The average content of chemicals in the soils of observation points on the background territories by administrative regions and Belarus as a whole (2018–2022), mg/kg (according to the NEMS)

Область	Бензо(а)-пирен	Нефте-продукты	SO ₄ ²⁻	Валовое содержание тяжелых металлов						
				Cd	Zn	Pb	Cu	Ni	Cr	Hg
Брестская	0,003	28,6	73,6	0,08	11,5	4,6	2,7	1,5	3,8	0,10
Витебская	0,001	28,6	59,7	0,06	18,2	4,8	4,2	2,9	4,2	0,04
Гомельская	0,002	19,7	65,0	0,08	13,1	4,7	3,8	3,1	2,7	0,03
Гродненская	0,001	21,1	52,3	0,10	16,9	6,1	3,6	3,2	3,1	0,06
Минская	0,002	16,4	54,2	0,16	21,7	4,8	4,1	3,1	7,5	0,02
Могилёвская	0,001	15,5	53,7	0,17	19,5	4,3	3,7	2,8	7,1	0,01
Среднее значение для Беларуси	0,002	21,6	59,7	0,11	16,8	4,9	3,7	2,8	4,7	0,04

В отличие от приведенного выше естественного фона существует понятие природно-антропогенного фона, за который принимается среднее содержание химического вещества в почве нарушенных природно-антропогенных геосистем, например, городов, сельскохозяйственных земель и др. Однако при расчете природно-антропогенного фона необходимо исключение определенной доли экстремальных значений, например, 5 % как минимальных, так и максимальных, во избежание искажения результатов за счет экстремальных значений. Последние, как правило, связаны с локальными источниками, имеют ограниченное распространение и характеризуются высокими градиентами контрастности. Экстремальные значения концентраций могут быть обусловлены также «горячими точками», связанными со «случайными» техногенными включениями в почве (свинцовых пуль, батареек, фрагментов оцинкованного металла, разбитых термометров и т. п.) [12]. При исключении экстремальных значений будем иметь представление о содержании химического вещества или загрязнении почв 90%-ной обеспеченности на анализируемой территории.

Природно-антропогенный фон может быть рассчитан для Беларуси в целом, региональный – для административной области, местный – для административного района или города; локальный – для близлежащих участков с аналогичным видом использования земель и сходными характеристиками почв. Природно-антропогенный фон должен рассчитываться без учета экстремальных значений, дополняться аналогичными данными в разрезе категорий земель или функциональных зон. Представляется не корректным в одну выборку объединять концентрации химических веществ в почвах, например, промзон, сельскохозяйственных земель и ландшафтно-рекреационных территорий.

Разновидностью использования природно-антропогенного фона является подход к выбору фоновой территории, изложенный в ТКП 17.03.01-2020 [13], устанавливающим требования к технологии работ по определению фонового содержания химических и иных веществ в почвах при проведении контроля химического загрязнения земель, в том числе для определения размера возмещения вреда, причиненного их деградацией. В этом случае в качестве фоновых выбираются близлежащие участки с аналогичным видом использования и сходными характеристиками земель и почв.

Плотность сети отбора проб и размер пробной площадки. Имеющиеся различия в ТНПА относительно требований к плотности сети отбора проб почв и размерам пробных площадок (ПП) обусловили их разночтение специалистами, что во многих случаях приводит к искажению результатов исследований (изысканий), создает коллизии при выборе подрядчиков на выполнение работ по геоэкологическим изысканиям и оценке загрязнения земель/почв. Требования к плотности сети отбора проб почв и размерам ПП в различных ТНПА представлены в табл. 2.

Таблица 2. Требования к плотности сети отбора проб почв и размерам пробных площадок (ПП) в различных ТНПА

Table 2. Requirements for the soil sampling network density and the sampling sites size (SS) in various TRLA

ТНПА	Площадь участка, м ²	Количество ПП	Размер ПП
ТКП 45-1.02-253-2012 [8]	В каждой функциональной зоне	Не менее 3	От 5 м × 5 м до 25 м × 25 м
ГОСТ 17.4.3.01-83 [14]	–	–	От 1 до 5 га при однородном почвенном покрове и от 0,5 до 1 га при неоднородном
ГОСТ 17.4.4.02-84 [15]	На каждые 0,5–20,0 га территории	Не менее 1	Не менее 10 м × 10 м
ТКП 17.03.02-2020 [4]	Менее 1000 1000–3000 3001–5000 5001–10 000 Более 10 000	Не менее 2 Не менее 4 10 16 Не менее 20	–

Согласно ТКП 45-1.02-253-2012 [8], на стадии градостроительного проектирования для оценки состояния почвенного покрова предусматривается заложение в каждой функциональной зоне не менее 3 ПП размером от 5 м × 5 м до 25 м × 25 м.

На прединвестиционной и проектной стадиях строительства количество и местоположение ПП определяются согласно ГОСТ 17.4.4.02-84 [15] и зависят от площади участка, сложности ландшафтных условий, наличия источников загрязнения земель и др. При проведении дополнительных исследований, обусловленных наличием визуально диагностируемого или обнаруженного после аналитических испытаний загрязнения земель, количество ПП определяется составом загрязнения, площадью загрязненного участка и сложностью ландшафтных условий.

В свою очередь, ГОСТ 17.4.4.02-84 [15] не регламентирует количество и местоположение ПП (дается лишь ссылка на ГОСТ 17.4.3.01-83 [14]), за исключением случаев контроля загрязнения сельскохозяйственных земель – «на каждые 0,5–20,0 га территории закладывают не менее одной пробной площадки размером не менее 10 м × 10 м».

Согласно ГОСТ 17.4.3.01-83 [14], при общих и локальных загрязнениях в зависимости от цели исследования размер ПП должен составлять от 1,0 до 5,0 га при однородном и от 0,5 до 1,0 га при неоднородном почвенном покрове. Предусматривается также сгущение сети ПП на почвах, загрязненных предположительно неравномерно.

В соответствии с ТКП 17.03.02-2020 [4] при определении степени загрязнения земель/почв химическими веществами количество ПП принимается в зависимости от площади контролируемой территории: при площади участка менее 100 м² она приравнивается к одной ПП, при площади участка менее 1000 м² – к 2 ПП, 1000–3000 м² – к не менее чем 4 ПП, 3001–5000 м² – к не менее чем 10 ПП, ..., при площади более 10 000 м² – к не менее чем 20 ПП (см. табл. 1). Близкий подход к определению плотности ПП при обследовании почв используется в Польше. Руководством по проведению оценки загрязнения земель [15] предусмотрена различная плотность ПП для разных категорий земель. На участках городских и промышленных земель до 0,05 га закладывается не менее 1 ПП, на участках от 0,05 до 1 га – не менее 3 ПП площадью не более 0,1 га, на участках от 1 до 10 га – не менее 10 ПП площадью не более 0,5 га, на участках более 10 га – не менее 20 ПП площадью не более 0,5 га каждая. По сравнению с ТКП 17.03.02-2020 [4] используемая в Польше методика предусматривает несколько менее плотную сеть ПП, однако использует более гибкий подход определения плотности заложения ПП для различных интервалов площадей обследуемых территорий.

Для лесных и сельскохозяйственных земель руководством предусмотрена меньшая плотность сети отбора при одновременном увеличении размеров ПП: на участках до 0,5 га закладывается не менее 1 ПП, на участках от 0,5 до 10 га – не менее 3 ПП площадью не более 1 га, на участках от 10 до 100 га – не менее 10 ПП площадью не более 5 га, на участках 100–500 га – не менее 20 ПП площадью не более 10 га, на участках более 500 га – не менее 40 ПП площадью не более 25 га каждая. Меньше плотная сеть опробования почв на сельскохозяйственных и лесных землях по сравнению с городскими и промышленными вполне оправдана, поскольку уровни загрязнения и контрастность аномалий в почвах городов и промзон значительно выше [1 и др.].

Как показывает опыт изысканий, при больших площадях ПП локальные ореолы загрязнения почв во многих случаях не фиксируются, поскольку могут попадать на пространства между точками отбора единичных проб, либо за счет «разбавления» загрязненных единичных проб другими относительно чистыми единичными пробами. Известны случаи, когда при отборе на заложенных ПП больших размеров (300 м × 250 м), не были подтверждены высокие уровни загрязнения почв. При этом объединялись единичные пробы с одинаковых интервалов глубин при значительных перепадах отметок поверхности, неоднородности складированных в разные временные периоды техногенных отложений, включая коммунальные и производственные отходы.

По-видимому, следует различать термины «размер опробуемого участка» и «размер пробной площадки», как например в ГОСТ 17.4.4.02-84 [15], в пункте 2.3.1 которого указано, что «для контроля загрязнения почв сельскохозяйственных угодий... на каждые 0,5–20,0 га территории закладывают не менее 1 пробной площадки размером не менее 10 м × 10 м».

Представляется, что при корректировке ТНПА по геоэкологическим изысканиям и оценке загрязнения почв необходимо регламентировать площади опробуемых участков или плотность заложения ПП, а также размеры (площади) ПП. Почвенно-геохимические исследования в составе инженерно-геоэкологических изысканий могут проводиться по менее плотной сети опробования по сравнению с работами по оценке загрязнения земель на загрязненных или предположительно загрязненных участках в зонах интенсивного техногенного воздействия. При этом отбор почвы необходимо производить в пределах ПП на наиболее репрезентативных участках размером от 10 м × 10 м до 25 м × 25 м. Отбор должен производиться методом конверта, с фиксацией центральной точки отбора с использованием средств космического позиционирования (GPS) и отбором единичных проб на расстояниях 5 или 10 м в северном, восточном, южном и западном направлениях от центра ПП. Это позволит, в случаях выявления аномальных содержаний химических веществ, легко находить точки отбора для проведения более детальных исследований и уточнения выявленных аномалий.

При определении загрязнения земель в соответствии с ТКП 17.03.02-2020 [4] опробуемые участки соответствуют ПП, в пределах которых должно отбираться не менее пяти единичных (точечных) проб для формирования объединенной пробы. Необходимо отметить, что, согласно польскому руководству по проведению оценки загрязнения земель [16], объединенные пробы формируются из 15 точечных проб. Но в данном случае площади опробования («секции») в несколько раз больше по сравнению с размерами ПП, предусмотренными ТКП 17.03.02-2020 [4].

При проведении мониторинга почв в городах, на фоновых территориях, при локальном мониторинге почв, предусматривающем повторное многолетнее опробование почв, количество индивидуальных проб должно равняться 5, как это предусмотрено методом конверта, а размер ПП должен составлять 25 м × 25 м в целях минимального нарушения почвы в пределах ПП.

Глубина отбора. В большинстве ТНПА Республики Беларусь, регламентирующих отбор проб почв и грунтов, указывается на интервалы глубин 0–19,9 см; 20,0–50,0 см; 50,1–100,0 см; 100,1–150,0 см; 150,1 см и более с интервалами 50 см [4 и др.]. Отбор проб с глубины 0–19,9 (0–20,0 см) оправдан, прежде всего, для контроля почв пахотных земель (табл. 3).

С точки зрения экологической безопасности наиболее приемлем отбор почв с глубины 0–5 или 0–10 см, поскольку основная масса загрязняющих веществ поступает на поверхность почвы и аккумулируется в приповерхностном ее слое. Реэмиграция почвенной пыли является важным каналом поступления многих загрязняющих веществ в организм человека. Оценивая загрязнение почвы по пробам, отобраным с глубины 0–20 см, мы занижаем уровень и опасность загрязнения почв, при этом снижается эффективность проведения мониторинга почв.

Таблица 3. Преимущества и недостатки отбора проб почв с глубины 0–20 см и при разделении слоя на 0–5 и 5–20 см

Table 3. Advantages and disadvantages of soil sampling from a depth of 0–20 cm and divided layers from 0–5 and 5–20 cm

Глубина отбора	Преимущества	Недостатки
0–20 см	Больше всего подходит для контроля почвы на пахотных землях	Занижается опасность загрязнения. Снижается эффективность проведения мониторинга
0–5 и 5–15 см	Более точно отражает степень, опасность и динамику загрязнения почвы	Увеличение стоимости работ примерно в 1,5 раза

Согласно прогнозу изменения содержания цинка в почвах естественных экосистем Беларуси за 15-летний период, оно возрастет в 10-сантиметровом слое почвы на 0,15–0,32 % [17]. Это означает, что при фоновом содержании цинка в почве 14,3 мг/кг приращение содержания цинка в почве за 15 лет составит 0,02–0,04 мг/кг почвы. При отборе почвы с глубины 0–20 см приращение будет примерно в 2 раза меньше, и, по сути, при проведении мониторинга мы будем получать информацию не о динамике изменения концентрации вещества в почве, а об ошибках метода измерения.

Методы оценки загрязнения и нормативы качества почвы. Показатели и используемые нормативы оценки качества почвы в Беларуси, согласно применяемым для этих целей ТНПА, существенно различаются (табл. 4). Согласно ТКП 17.03-02-2020 [4], определение площади загрязненных территорий, глубины загрязнения и степени деградации земель/почв проводится по результатам проведения измерений и сопоставления полученных значений с дифференцированными нормативами, при их отсутствии – с гигиеническими нормативами (предельно или ориентировочно допустимыми концентрациями химических веществ в почвах (ПДК/ОДК), а при отсутствии этих нормативов – с показателями фоновых концентраций.

В Беларуси, как и в большинстве постсоветских стран, нормирование почв базируется на санитарно-гигиеническом подходе и концепции предельно-допустимых концентраций – такого содержания химических элементов в среде, которое в течение длительного времени не вызывает прямого или косвенного негативного влияния на здоровье человека, включая отдаленные последствия. Учитывая недостатки концепции, прежде всего в невозможности обеспечить пороговые значения (ПДК/ОДК) на территориях с интенсивной техногенной нагрузкой, в начале 2000-х годов были разработаны методика и гигиенические нормативы содержания ряда химических веществ в почвах с учетом категории и функционального использования территорий [18, 19]. Данное новшество приближало нормирование почв в Беларуси к практикуемому в Европейских странах. В середине 2010-х годов по инициативе Минприроды в Беларуси началась разработка экологических нормативов для почв, реализованная в виде дифференцированных нормативов (ДН) [20]. В июле 2023 г. ДН для почв получили законодательную основу – в новой редакции Закона об охране окружающей среды Республики Беларусь перечень нормативов качества окружающей среды дополнен таким видом как «дифференцированные нормативы содержания химических веществ в почвах».

Таблица 4. Методы и показатели оценки загрязнения почв в Беларуси**Table 4. Methods and indicators for soil pollution assessment in Belarus**

Вид исследования/ мониторинга	Метод оценки	Показатель оценки	Руководящий документ/ источник
Эколого- геохимические исследования	Сравнение с фоном и гигиеническими нормативами	Коэффициент концентрации по отношению к фону. Кратность превышения ПДК/ОДК	Гигиенические нормативы..., 2021 [21]
Мониторинг на фо- новых территориях	То же	Кратность превышения фона за предшествующий тур	Инструкция... [3]
Мониторинг в населенных пунктах	– » –	Кратность превышения фона. Кратность превышения ПДК/ОДК	Инструкция... [3], Гигиенические нормативы..., 2021 [21]
Локальный мониторинг	Сравнение с дифференцирован- ными нормативами	Превышение порогового значения «низкой степени загрязнения почвы». Соответствие измеренной концентрации вещества шкале дифференцированных нормативов	ЭкоНП 17.03.01-001-2021 [20]
Контроль загрязнения почв	То же. Сравнение с местным фоном	То же. Кратность превышения местного фона	ЭкоНП 17.03.01-001-2021 [20], ТКП 17.03-01-2020 [13]
Агрохимическое обследование почв сельскохозяйст- венных земель	Сравнение с нормативами (ОДК) для почв сельско- хозяйственных земель	Кратность превышения ОДК для почв сельскохозяйственных земель	Методика... обследования почв сельскохозяйственных земель..., 2020 [7]
Инженерно- геоэкологические изыскания для строительства	Сравнение с гигиеническими нормативами	Кратность превышения ПДК/ОДК	ТКП 45-1.02-253-2012 [8]

В настоящее время оценка загрязнения почв с использованием ДН проводится, главным образом, при локальном мониторинге и контроле загрязнения почв. При мониторинге почв населенных пунктов и инженерно-геоэкологических изысканиях оценка загрязнения почв проводится с использованием гигиенических нормативов, применение для этих целей ДН проблематично. Это связано, прежде всего:

- с высокой степенью субъективности и неопределенности при расчетах приемлемых уровней концентрации и пороговых значений химических веществ в почвах и введении поправочных коэффициентов для различных категорий земель и видов территориальных зон по преимущественному функциональному использованию территорий населенных пунктов [22];

- со значительными различиями нижних пороговых значений концентрации определенного химического вещества при оценках загрязнения почв с использованием гигиенических и дифференцированных нормативов. Нижние пороговые значения концентраций химических веществ в ДН, позволяющие относить оцениваемую почву к категории «загрязненной», в большинстве случаев выше, чем в гигиенических (различия в ряде случаев составляют 2 раза и более). При этом внимания заслуживает диапазон концентраций между указанными пороговыми значениями, поскольку он выходит за пределы «содержания химических элементов в среде, которое, согласно гигиеническим нормативам, в течение длительного времени не вызывает прямого или косвенного негативного влияния на здоровье человека», т. е. существует опасность влияния на здоровье человека концентраций химических веществ в почвах, диагностируемых, согласно ДН, как «незагрязненные». Примеры различий пороговых значений гигиенических, экологических и агрохимических нормативов концентраций тяжелых металлов в почве показаны в табл. 5.

Таблица 5. Сравнение показателей гигиенических, экологических и агрохимических нормативов концентраций тяжелых металлов в почве принятых в Беларуси**Table 5. Comparison of hygienic, environmental and agrochemical standards for the content of heavy metals in soil used in Belarus**

Норматив	Показатель	Грансостав	Pb	Zn	Cd	Cu	Cr
Гигиенический [21]	ПДК/ОДК	Песок/супесь	32	55	0,5	33	100
Экологический [20]	Пороговый уровень низкой степени загрязнения	Песок	35,6	72,2	0,95	28,3	45,6
		Супесь	35	60	0,4	60	150
Агрохимический [7]	ОДК	Песок	25	50	0,3	35	80
		Супесь	35	60	0,4	60	150

Заключение. Применение различных методических подходов к процедуре оценки и нормированию загрязнения почв, нестыковки и противоречия в действующих ТНПА обуславливают значительную долю субъективности и неоднозначность получаемых оценок загрязнения почв в Беларуси. В этой связи назрела необходимость совершенствования нормативно-методического обеспечения изучения и оценки загрязнения почв.

Представляется, что данную работу наиболее целесообразно осуществить в таких направлениях, как:

- дифференциация гигиенических нормативов концентраций химических веществ в почвах в зависимости от категорий и видов использования земель;
- унификация методических подходов изучения и оценки загрязнения почв при мониторинге, контроле загрязнения почв, инженерно-геоэкологических изысканиях, оценке загрязнения почв при реконструкции или размещении объектов нового строительства;
- более четкое регламентирование размеров пробных площадок и плотности сети отбора в зависимости от цели изучения и оценки загрязнения почв;
- уменьшение глубины отбора почв при проведении мониторинга почв на фоновых территориях и в населенных пунктах с целью повышения эффективности наблюдений;
- более детальное обоснование перечней приоритетных загрязняющих веществ, подлежащих изучению при различных видах мониторинга, обследования и оценки загрязнения почв.

Список использованных источников

1. Городская среда: геоэкологические аспекты / В. С. Хомич [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 426 с.
2. Головатый С. Е. Тяжелые металлы в агроэкосистемах / С. Е. Головатый. – Минск : Ин-т почвовед. и агрохимии, 2002. – 240 с.
3. Инструкции о порядке проведения наблюдений за химическим загрязнением земель : утв. приказом Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 30 июля 2015 г., № 250-ОД. – Минск, 2015. – 23 с.
4. Правила выполнения работ по определению загрязнения земель (включая почвы) химическими веществами : ТКП 17.03-02-2020 (33140). – Минск, 2020. – 14 с.
5. Инструкция о порядке проведения локального мониторинга окружающей среды : утв. Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 1 февр. 2007 г., № 9 (в редакции постановления Минприроды, 30.12.2020, № 29). – Минск, 2020. – 15 с.
6. Гигиеническая оценка почвы населенных мест: Инструкция 2.1.7.11-12-5-2004 : утв. Постановлением Гл. гос. санитарного врача № 32 от 03.03.04 // Сборник нормативных документов по гигиенической оценке почвы населенных мест. – Минск, 2004. – С. 3–38.
7. Методика крупномасштабного агрохимического и радиационного обследования почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь / И. М. Богдевич [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск : Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2020. – 48 с.
8. Инженерно-геоэкологические изыскания для строительства. Правила проведения : ТКП 45-1.02-253-2012 (02250). – Минск, 2012. – 45 с.
9. Хомич, В. С. Региональный геохимический фон // Природа Беларуси : энциклопедия : в 3 т. – Минск : Беларуская энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2010. – Т. 1 : Земля и недра. – С. 356–357.
10. Научно-методические подходы к определению фоновых параметров содержания химических веществ в почвах Беларуси / С. В. Савченко [и др.] // Земля Беларуси. – 2019. – № 2. – С. 40–48.
11. Парфенов, В. В. Мониторинг земель на фоновых территориях / В. В. Парфенов // Органическое сельское хозяйство Беларуси: перспективы развития : материалы Междунар. науч.-техн. конф. ; сост. Н. И. Поречина. – Минск : Мэджик, 2012. – С. 61–64.
12. Кадацкий, В. Б. Технофильные элементы в почвах Беларуси : дис. ... д-ра геогр. наук : 11.00.01 / В. Б. Кадацкий. – Минск, 1995. – 44 с.
13. Охрана окружающей среды и природопользование. Земли. Правила выполнения работ по определению фоновой концентрации химического вещества в почвах : ТКП 17.03-01-2020 (33140). – Минск, 2020. – 17 с.
14. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб : ГОСТ 17.4.3.01-83. – Минск : Госстандарт, 2020. 4 с.
15. Охрана природы. Почвы. Метод отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа : ГОСТ 17.4.4.02-84. – Минск : Госстандарт, 2020. – 4 с.
16. Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi z dnia 1 września 2016 r. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej. Warszawa, dnia 5 września 2016 r. Poz. 1395. – 86 s.
17. Прогноз состояния природной среды Беларуси на период до 2035 года / В. М. Байчоров и др. ; под общ. ред. В. С. Хомича. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 426 с.
18. Нормативы предельно допустимых концентраций подвижных форм никеля, меди и валового содержания свинца в землях (включая почвы), расположенных в границах населенных пунктов, для различных видов

территориальных зон по преимущественному функциональному использованию территорий населенных пунктов : утв. Постановлением Министерства здравоохранения Респ. Беларусь, 19 нояб. 2009 г., № 125. – Минск, 2020. – 2 с.

19. Предельно допустимые концентрации нефтепродуктов в землях (включая почвы) для различных категорий земель : утв. Постановлением Министерства здравоохранения Респ. Беларусь, 12 марта 2012 г., № 17/1. – Минск, 2012. – 1 с.
20. Охрана окружающей среды и природопользование. Земли (в том числе почвы). Нормативы качества окружающей среды. Дифференцированные нормативы содержания химических веществ в почвах и требования к их применению : ЭкоНП 17.03.01-001-2021. – Минск, 2021. – 34 с.
21. Показатели безопасности и безвредности почвы : гигиенический норматив : утв. Постановлением Совета Министров Респ. Беларусь, 25 янв. 2021 г., № 37. – Минск, 2021. – С. 225–230.
22. Охрана окружающей среды и природопользование. Земли. Порядок выполнения работ по дифференцированному нормированию содержания химических веществ в землях (включая почвы) : ТКП 17.03-06-2019 (33140). – Минск, 2019. – 21 с.

References

1. Khomich V. S. [et al.] *Gorodskaya sreda: geoekologicheskie aspekty* [Urban environment: geoecological aspects]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012, 426 p. (in Russian)
2. Golovatyj S. E. *Tyazhelye metally v agroekosistemah* [Heavy metals in agroecosystems]. Minsk, Institute of Soil Science and Agrochemistry Publ., 2002, 240 p. (in Russian)
3. *Instrukciya o poryadke provedeniya nablyudenij za himicheskim zagryazneniem zemel'* [Instructions on the procedure for conducting observations of chemical pollution of lands]. Approved by the Order of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 30 July 2015, no. 250-OD, 23 p. (in Russian)
4. *TKP 17.03.02–2020 (02120) Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Zemli. Pravila vypolneniya rabot po opredeleniyu zagryazneniya zemel' (vkluchaya pochvy) himicheskimi veshchestvami* [Technical code of established practice 17.03.02–2020 (02120). Environmental protection and environmental management. Of the earth. Rules for the performance of work to determine the contamination of land (including soil) with chemicals]. Minsk, 2020, 14 p. (in Russian).
5. *Instrukciya o poryadke provedeniya lokalnogo monitoringa okruzhayushchej sredy* [Instructions on the procedure for conducting local environmental monitoring]. Approved by the Order of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 1 February 2007, no. 9 (in ed. 30 December 2020, no. 29), 15 p. (in Russian)
6. *Gigienicheskaj ocenka pochvy naselennyh mest: instrukcij 2.1.7.11-12-5-2004* [Hygienic assessment of the soil of populated areas: Instructions 2.1.7.11-12-5-2004]. Approved by Resolution of the Chief State Sanitary Doctor no. 32, 03 March 2004. *Sbornik normativnyh dokumentov po gigienicheskaj ocenke pochvy naselennyh mest = Proc. of normative documents on the hygienic assessment of the soil of populated areas*. Minsk, 2004, pp. 3–38. (in Russian)
7. Bogdevich I. M. [et al.]. *Metodika krupnomashtabnogo agrohimicheskogo i radiacionnogo obsledovaniya pochv sel'skohozajstvennyh zemel Respubliki Belarus* [The methodology of large-scale agrochemical and radiation examination of soils of agricultural lands of the Republic of Belarus]. Minsk, Institute of System Research in the Agroindustrial Complex of the NAS of Belarus Publ., 2020, 48 p. (in Russian)
8. *TKP 45-1.02-253-2012 (02250) Ingenerno-geoekologicheskie izyskaniya dlya stroitelstva. Pravila provedeniya* [Technical code of established practice 45-1.02-253-2012 (02250). Geoecological engineering surveys for construction. The rules of the event]. Minsk, 2012, 45 p. (in Russian).
9. Khomich V. S. *Regionalnyj geohimicheskij fon* [Regional geochemical background]. *Pryroda Belarusi. Enciklopediya: v 3 t. T. 1. Zemlya i nedra = The nature of Belarus, encyclopedia: in 3 vol., vol. 1, Earth and Subsoil*. Minsk, P. Brovka Belarusian Encyclopedia Publ., 2010, pp. 356–357. (in Russian)
10. Savchenko S. V., Lukashev O. V., Parfenov V. V., Khomich V. S. *Nauchno-metodicheskie podhody k opredeleniyu fonovyh parametrov sodержaniya himicheskix veshchestv v pochvah Belarusi* [Scientific and methodological approaches to the determination of background parameters of the content of chemicals in the soils of Belarus]. *Zemlya Belarusi = The Land of Belarus*, 2019, no. 2, pp. 40–48. (in Russian)
11. Parfenov V. V. *Monitoring zemel na fonovyh territoriyah* [Monitoring of lands in background territories]. *Organicheskoe sel'skoe hozyajstvo v Belarusi: perspektivy razvitiya. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. of the int. sci. and tech. conf. 'Organic agriculture of Belarus: prospects for development']. Comp. N. I. Porechina. Minsk, Magic LLC, 2012, pp. 61–64. (in Russian)
12. Kadatsky V. B. *Tehnofilnye elementy v pochvah Belarusi. Diss. dokt. geogr. nauk* [Technophilic elements in the soils of Belarus. Dr. geogr. sci. diss.]. Minsk, 1995, 44 p. (in Russian)
13. *TKP 17.03.01-2020 Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Zemli. Pravila vypolneniya rabot po opredeleniyu fonovoy koncentracii himicheskogo veshchestva v pochvah* [Technical code of established practice 17.03.01-2020. Environmental protection and environmental management. Of the earth. Rules for performing work to determine the background concentration of a chemical substance in soils]. Minsk, 2020, 17 p. (in Russian)
14. GOST 17.4.3.01-83 *Ohrana pryrody. Pochvy. Obshchie trebovanij k otboru prob* [State Standart 17.4.3.01-83. Nature conservation. Soils. General requirements for sampling]. Minsk, State Standard Publ., 2020, 4 p. (in Russian)

15. GOST 17.4.4.02-84 *Ohrana pryrody. Pochvy. Metod otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo, bakteriologicheskogo, helmentologicheskogo analiza* [State Standart 17.4.4.02-84. Nature conservation. Soils. Method of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Minsk, State Standard Publ., 2020, 4 p. (in Russian)
16. Rozporzadzenie Ministra Srodowiska w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi z dnia 1 września 2016 r. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej. Warszawa, dnia 5 września 2016 r. Poz. 1395, 86 p. (In Polish)
17. Bajchorov V. M., Bakarikova G. V., Bogdevich I. M. [et al.]. *Prognoz sostoyaniya prirodnoj sredy Belarusi na period do 2035 goda* [The forecast of the state of the natural environment of Belarus for the period up to 2035]. Ed. V. S. Khomich. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012, 426 p. (in Russian)
18. *Normativy predel'no dopustimyykh koncentraciy podvizhnykh form nikelya, medi i valovogo sodержaniya svinca v zemlyah (vklyuchaya pochvy), raspolozhennykh v granichakh naselennykh punktov, dlya razlichnykh vidov territorial'nykh zon po preimushchestvennomu funktsional'nomu ispol'zovaniyu territoriy naselennykh punktov* [Standards of maximum permissible concentrations of mobile forms of nickel, copper and total lead content in lands (including soils) located within the boundaries of populated areas for various types of territorial zones on the basis of primarily functional use of the territories of populated areas] (Ap. by the Resolution of the Ministry of Health of the Republic of Belarus, 19 November 2009, no. 125). Minsk, 2009, 2p. (in Russian)
19. *Predel'no dopustimyye koncentracii nefteproduktov v zemlyah (vklyuchaya pochvy) dlya razlichnykh kategoriy zemel'* [Maximum permissible concentrations of petroleum products in lands (including soils) for various categories of lands] (Ap. Resolution of the Ministry of Health of the Republic of Belarus, 12 March 2012, no. 17/1). Minsk, 2012, 1 p. (in Russian)
20. *EkoNiP 17.03.01-001-2020 Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Zemli (v tom chisle pochvy). Normativy kachestva okruzhayushchej sredy. Differencirovannyye normativy sodержaniya himicheskikh veshchestv v pochvah* [Environmental protection and nature management. Land (including soil). Environmental quality standards. Differentiated standards for the content of chemicals in soils]. Minsk, 2020, 34 p. (in Russian)
21. *Pokazateli bezopasnosti i bezvrednosti pochvy : gigenicheskij normativ* [Indicators of safety and harmlessness of the soil: hygienic standard]. Approved by the Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, 25 January 2021, no. 37, pp. 225–230. (in Russian)
22. *TKP 17.03-06-2019 (33140) Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Zemli. Poryadok vypolneniya rabot po differencirovannomu normirovaniyu soderganiya himicheskikh veshchestv v zemlyah (vklyuchaya pochvy)* [Environmental norms and rules 17.03-06-2019 (33140). Environmental protection and environmental management. Of the earth. The procedure for carrying out work on the differentiated regulation of the content of chemicals in lands (including soils)]. Minsk, 2019, 21 p. (in Russian)

Информация об авторе

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

Information about the author

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

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ
GEOLOGY. MINERALS

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-107-117>
УДК 550.838.6

Поступила в редакцию 21.08.2023
Received 21.08.2023

**АДАПТАЦИЯ ОПЫТА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ БЕЛАРУСИ ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО
ИЗУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ ЭНДЕРБИ ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ**

А. К. Хиби́ев, П. В. Шаблы́ко, С. Л. Сушкевич, М. А. Шемети́ло

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье описан опыт полевых геомагнитных наблюдений, в частности использование методик площадной, маршрутной и синхронной стационарной геомагнитной съемки, на геодинамических полигонах Беларуси, применимый для аналогичных работ на территории белорусской антарктической станции. Описаны варианты применения методик на геодинамических полигонах Беларуси, а также результаты их внедрения при полевых работах на Белорусской Антарктической Станции. Геолого-геофизические исследования на территории Антарктиды включают в себя ежегодный контроль за вариациями геомагнитного поля, каппаметрические измерения свойств горных пород, радиометрическую съемку участков выхода коренных пород, шлиховое опробование участков сноса обломочных пород. В 2021 г. была построена микромагнитная карта Вечернегорской площади; в 2022 г. предложена проектная детализированная схема заложения геодинамического полигона на Вечернегорской площади. В рамках антарктических исследований все три метода были опробованы и внедрены на геодинамических полигонах территории Беларуси.

Ключевые слова: магнитное поле; вариации; методика; Антарктида; геодинамический полигон.

Для цитирования. Хиби́ев А. К., Шаблы́ко П. В., Сушкевич С. Л., Шемети́ло М. А. Адаптация опыта геофизических исследований на геодинамических полигонах Беларуси для геологического изучения Земли Эндерби Восточной Антарктиды // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 107–117.

**ADAPTATION OF GEOPHYSICAL RESEARCH EXPERIENCES
AT GEODYNAMIC POLYGONS OF BELARUS FOR GEOLOGICAL STUDY
OF THE ENDERBY LAND OF THE EAST ANTARCTICA**

A. K. Khibiyev, P. V. Shablyka, S. L. Sushkevich, M. A. Shemiatsila

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

Abstract. The article describes the experience of field geomagnetic observations, in particular the use of areal, route and synchronous stationary geomagnetic survey techniques at geodynamic polygons in Belarus, applicable for similar work on the territory of the Belarusian Antarctic Station. Options for methods use at geodynamic ranges in Belarus are described, as well as the results of their implementation during fieldwork at the Belarusian Antarctic Station. Geological and geophysical research on the territory of Antarctica includes the annual monitoring of variations in the geomagnetic field, the capping measurements of rock properties, the radiometric surveying of bedrock outcrops, and the spot sampling of clastic rock removal areas. In 2021, a micromagnetic map of Vechnegorskaya territory was built. In 2022, a detailed design plan for the establishment of a geodynamic test site on Vechnegorskaya territory was proposed. Before implementation as a part of the Antarctic research, all three methods were tested and implemented at geodynamic testing sites on the territory of Belarus.

Keywords: magnetic field; variations; methodology; Antarctica; geodynamic polygon.

For citation. Khibiyev A. K., Shablyka P. V., Sushkevich S. L., Shemiatsila M. A. Adaptation of geophysical research experiences at geodynamic polygons of Belarus for geological study of the Enderby Land of the East Antarctica. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 107–117.

Геомагнитные измерения на геодинамических полигонах Беларуси. Целью проведения полевых работ в Антарктиде является изучение тектонического строения Вечернегорской структуры на основании геолого-геофизических исследований земной коры. Геофизические, и в частности геомагнитные, наблюдения на геодинамических полигонах Беларуси проводятся в рамках подпрограммы 5 «Национальная система мониторинга окружающей среды» Государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2021–2025 годы. В связи с особенностями рельефа, тяжелыми погодными условиями и ограниченным временным ресурсом проведения полевых работ в антарктических условиях, все методики опробуются и доводятся до идеала на геодинамических полигонах Беларуси. Объектом исследований в обоих случаях являются зоны с аномальным и стабильным поведением геомагнитного поля, зоны разломов и стабильные участки земной коры. Начальная стадия возможного использования геофизических методов в Антарктиде апробируется в пределах белорусских геодинамических полигонов.

Воложинская магнитная аномалия простирается от Молодечно до Новогрудка. Расположена она в пределах Белорусской антеклизы. Северное окончание контролируется интенсивной Вилейской магнитной аномалией поперечного простираения и соответствующим субширотным Вилейским разломом [1]. Восточная оконечность аномалии возмущающего аномального тела совпадает с субрегиональным Кореличским разломом мантийного заложения, являющимся восточной границей Белорусско-Прибалтийского гранулитового пояса. В фундаменте зона Кореличского разлома имеет ширину около 15 км. Полигон пересекает зону Налибокского глубинного разлома. Кореличская зона разломов является форпостом надвига Фенноскандинавской литосферной плиты на Сарматскую плиту, образовавшегося около 2,0 млрд лет тому назад [1]. В результате надвига в слое земной коры Белорусско-Прибалтийского гранулитового пояса сформировалась система криволинейных разломов, ориентированных на запад.

В тектоническом отношении район Молодечненской магнитной аномалии расположен в пределах Воложинского грабена Белорусской антеклизы, а также Вилейского погребенного выступа. Рассматриваемая аномалия находится в Центрально-Белорусской зоне кристаллического фундамента. Поверхность фундамента в пределах Вилейского погребенного выступа погружается от 0,2 до 0,7 км. В Воложинском грабене она расположена на отметках от –0,2 до –0,4 км. В структуре полигона присутствует Ошмянский разлом, пересекающий территорию с северо-запада на юго-восток.

Октябрьский геодинамический полигон располагается в западной части Припятского прогиба и состоит из двух участков на территории Любанского района Минской области и Октябрьского района Гомельской области Беларуси. В пределах данного полигона выделяются две основные геомагнитные аномалии. Любанская аномалия на западе и Октябрьская – на востоке. В тектоническом отношении Любанская геомагнитная аномалия приурочена к северо-западной части Припятского прогиба в западной части Восточно-Европейской платформы. Припятский прогиб имеет сложное и неоднородное тектоническое строение кристаллического фундамента, некоторые блоки которого опущены на глубину до 4–6 км. На севере полигон ограничивают Речицко-Вишанский, а на юге – Червоно-Слободской субрегиональные разломы мантийного заложения.

На протяжении ряда лет на Воложинском локальном полигоне выполняются повторные гравиметрические и геомагнитные наблюдения с целью выявления вариаций геофизических полей во времени. Изучение приконтактных зон разломов на основании синхронных геомагнитных наблюдений с целью уточнения границ зон разломов и оценки их физических характеристик производили методом стационарной синхронной магнитной съемки.

Магнитометры устанавливали в двух точках: потенциально стабильной зоне и предполагаемой зоне разлома. В результате мониторинга анализировали графики полей T . Синхронно наблюдая за ходом геомагнитного поля в течение нескольких часов в зоне разлома и в соседних блоках земной коры, получали информацию о различии особенностей протекания современных тектонофизических процессов в зонах разломов относительно контактирующих жестких блоков. По характеру морфологии разностного поля и его амплитуды можно судить о степени интенсивности протекающих тектонофизических процессов в зоне разлома, а отсюда – принимать решения о предполагаемом распространении возможных видов полезных ископаемых в таких современных активных тектономагматических зонах [2].

В частности, на Воложинском локальном полигоне синхронные наблюдения магнитного поля были многократно проведены при установке магнитометров в пункте Бурмаки на магнитной аномалии северо-восточного простираения, контролирующей Кореличский глубинный разлом, и за ее пределами – в пункте Криница, расположенном практически в нормальном поле (рис. 1). Затем полученные кривые магнитных полей сравнивали между собой (рис. 2). Абсолютные значения разности, морфология

и динамика во времени – это факторы, позволяющие составить широкий спектр суждений о тектоно-физической активности, а также – о геологическом строении территории. При этом расстояние между пунктами наблюдений не должно превышать размеры области стабильности вариационной картины внешнего быстропротекающего магнитного поля, равные 50–70 км.



Рис. 1. Карта геомагнитных аномалий в зоне Воложинского полигона, нТл

Fig. 1. Map of geomagnetic anomalies in the Volozhin polygon, nT



Рис. 2. Абсолютная разность показаний поля Z между зоной аномальных магнитных возмущений и зоной отсутствия аномального магнитовозмущающего тела

Fig. 2. The absolute difference in Z field readings between zone of anomalous magnetic disturbances and the zone of absence of an anomalous magnetically disturbing body

Измерения модуля вектора магнитного поля T по маршрутам производили ежегодно на Молодечненском геодинамическом полигоне. При этом в процессе наблюдений использовали два прибора: один – на маршруте; второй – в качестве магнитовариационной станции, обеспечивающей введение поправок за изменение магнитного поля во времени в процессе передвижения по маршруту. Контрольно-точечные измерения поля T выполняли непосредственно в пункте наблюдения и в его окрестности в радиусе 50–100 м до 15 значений. Результат – среднее значение приписывали пункту наблюдения. Маршрутные магнитные измерения поля T вдоль профиля выполняли с шагом 50–200 м. Магнитометр имеет встроенный в прибор GPS-приемник, который обеспечивает привязку данных к глобальному времени и определяет координаты места его расположения. Это дает возможность не только измерять приращения магнитного поля между пунктами полигона, но и, что особенно важно для геодинамических исследований, организовать синхронную работу нескольких магнитометров.

Систематические повторные геофизические наблюдения на Молодечненском полигоне фиксируемых вариаций гравитационного и магнитного полей во времени являются методическим контролем за протеканием современных глубинно-магматических процессов в зоне расположения предполагаемой сейсмоастеносферной Молодечненской линзы. Динамика изменений показателей магнитного поля наглядно представлена на рис. 3, а поведение магнитного поля на стабильном участке, в котором была установлена вариационная станция, – на рис. 4.

Для заложения геодинамического полигона в районе города Октябрьский было принято решение провести четыре рекогносцировочные маршрутные съемки с шагом 200–500 м. Цель полевых работ – провести изучение современной геомагнитной обстановки в регионе. Маршруты в основном субмеридионального направления (рис. 5) заложены таким образом, чтобы выявить максимальную дифференциацию геомагнитных показателей на двух основных аномалиях: восточной (Октябрьской) и западной (Любанской).

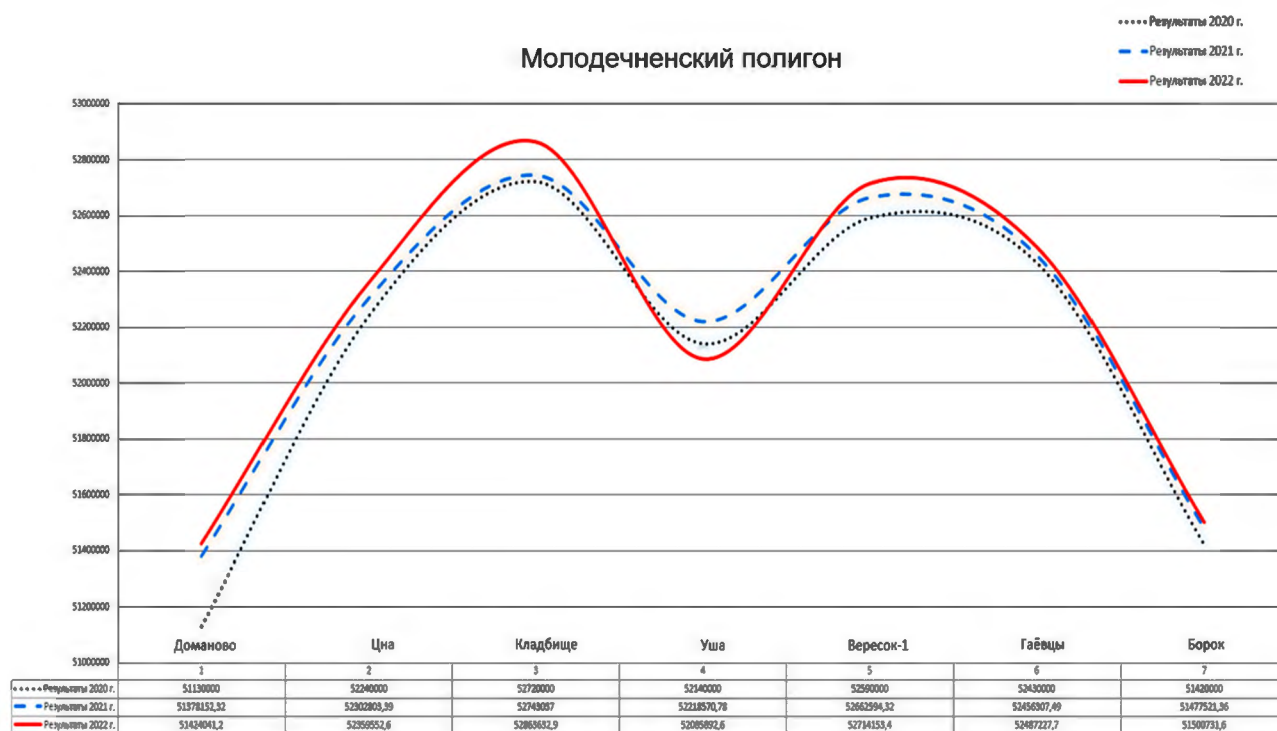


Рис. 3. Графики показаний магнитного по маршруту Молодечненского геодинамического полигона, 2020–2022 гг. (по оси Y указаны значения магнитного поля, нТл; по оси X – названия пунктов наблюдений)

Fig. 3. Graphs of magnetic readings along the route of the Molodechno geodynamic polygon, 2020–2022 (on the Y axis are values of the magnetic field, nT; on the X axis are names of observation points)



Рис. 4. Результат измерений магнитного поля на вариационной станции (обозначения см. на рис. 3)

Fig. 4. The result of magnetic field measurements at the variation station (designations see in fig. 3)



Рис. 5. Октябрьский полигон: Любанская и Октябрьская магнитные аномалии

Fig. 5. Oktyabrsky polygon: Lyuban and Oktyabrsk magnetic anomalies

После маршрутных была выполнена площадная магнитометрическая съемка, включающая 1070 измерений на 214 точках наблюдения на западной части полигона, ограничивающей Любанскую магнитную аномалию. Цель работы – построить карту магнитного поля на основе полученных данных (рис. 6).

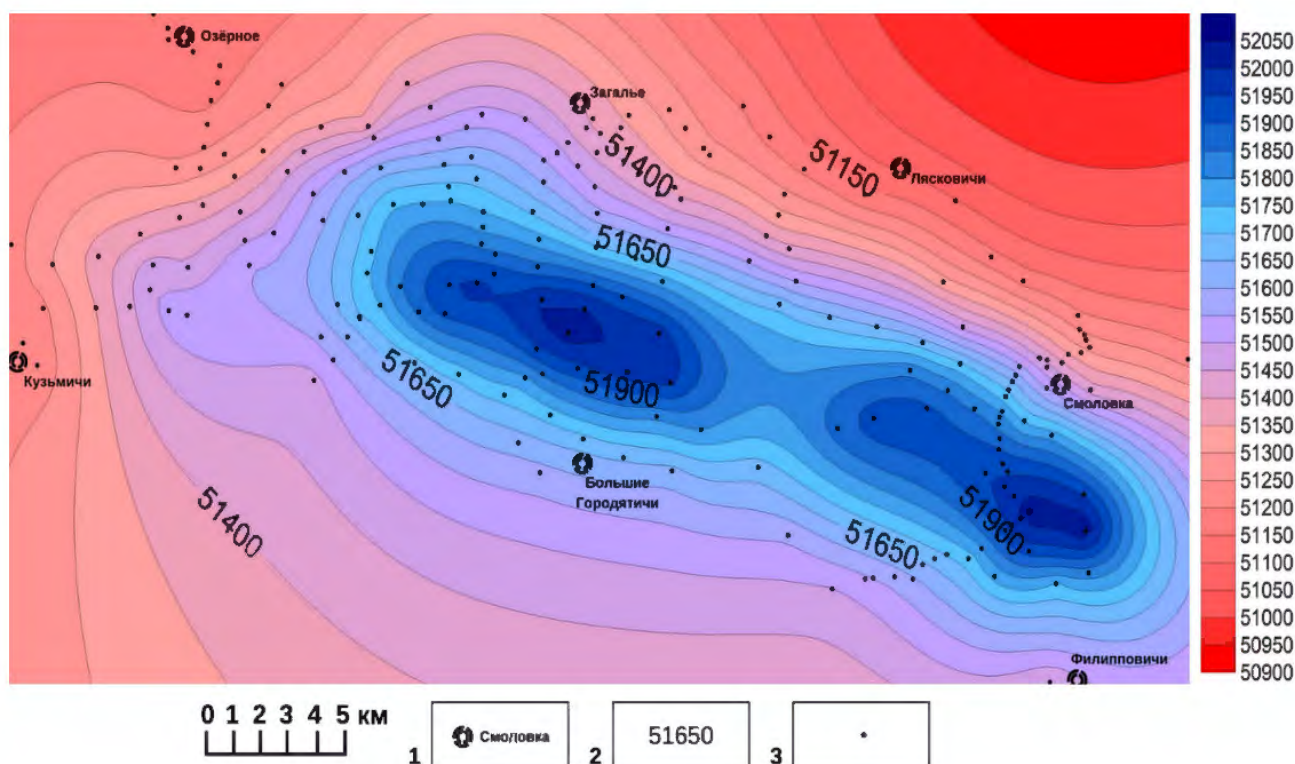


Рис. 6. Схематическая карта магнитного поля на Любанской аномалии Октябрьского геодинимического полигона: 1 – обозначения населенных пунктов; 2 – значения изолиний в нТл; 3 – точки геомагнитных наблюдений

Fig. 6. Schematic map of magnetic field at the Lyuban anomaly of the Oktyabrsky geodynamic polygon: 1 – designations of populated areas; 2 – values of isolines in nT; 3 – points of geomagnetic observations

Выполнение магнитометрических работ на Вечернегорской площади Земли Эндерби Восточной Антарктиды. Стационарные геомагнитные наблюдения. Начиная с сезона 2008–2009 гг. и до настоящего времени выполнен ряд замеров вариаций компонент магнитного поля Земли в стационарном режиме. Считается, что вариации геомагнитного поля тектонофизического происхождения могут являться индикаторами структуры и вещественного состава зон глубинных разломов и современных тектонофизических процессов. Следовательно, данные о пространственно-временных вариациях полей могут быть использованы для выявления на территории Белорусской Антарктической Экспедиции (БАЭ) зон современной тектоно-магматической активизации, и прежде всего зон активизации глубинных разломов мантийного заложения, возможно, перспективных на полезные ископаемые металлогенического ряда. Причиной геомагнитных вариаций принято считать внешние источники тока, связанные с процессами магнитосферно-ионосферного взаимодействия. На Вечернегорской площади выполнен ряд суточных наблюдений за вариациями геомагнитного поля с периодичностью 20 секунд.

После обработки данных и построения графиков изменения поля T была проведена корреляция данных с ближайшей австралийской антарктической станцией – «Моусон», которая является участником мировой системы INTERMAGNET (INTERMAGNET). Международная сеть магнитных обсерваторий реального времени INTERMAGNET – всемирный консорциум институтов, занимающихся записью данных наземных магнитометров, определяя абсолютный уровень изменяющегося во времени магнитного поля Земли в соответствии с согласованным набором стандартов [3].

Согласно проведенным исследованиям, установлена четкая временная корреляция синхронного изменения магнитного поля на территории Вечернегорской площади и на станции «Моусон». Первоначальный анализ данных указывает на существенное изменение магнитного поля в ночные часы по всем дням измерений в промежутках с 20.00 до 03.00 по всемирному координированному времени (UTC). На данный момент времени можно предположить связь 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 . Наибольшие же вариации магнитного поля в течение дня в некоторых случаях имеют прямую связь с магнитными бурями.

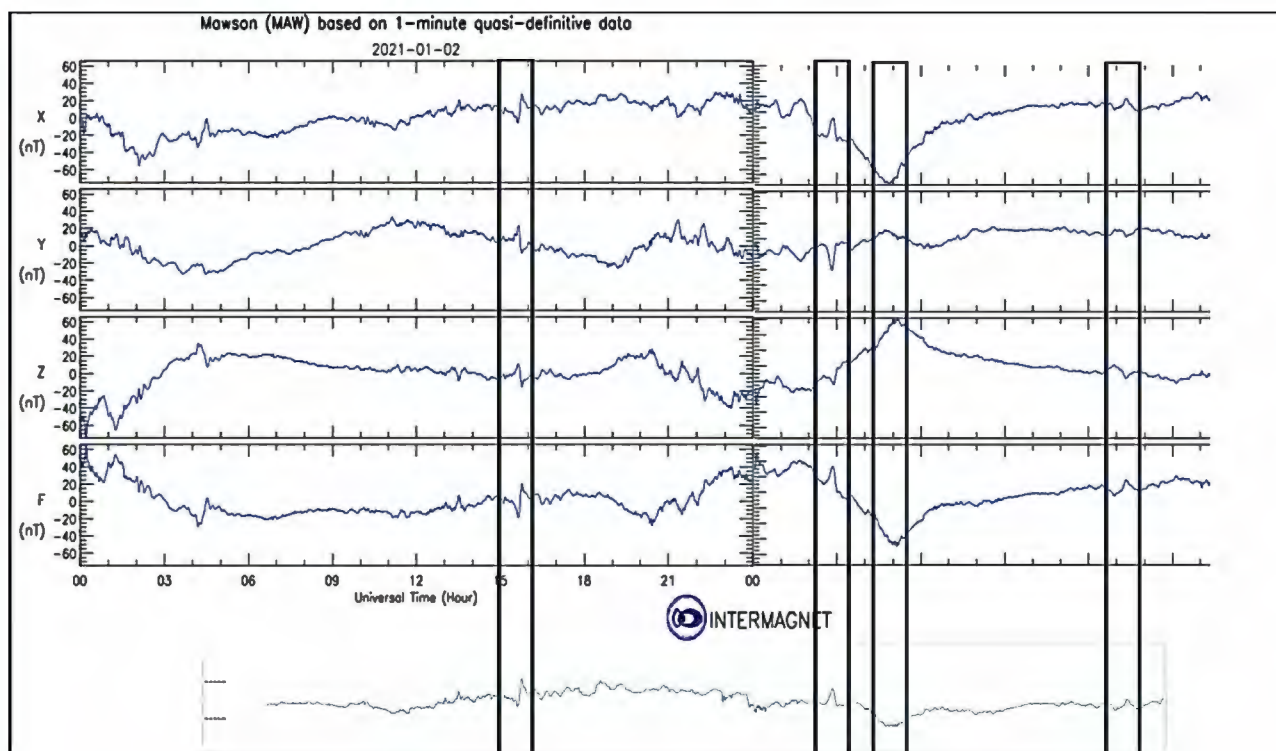


Рис. 7. Вариационный график в период с 22.02.21 по 23.02.21 в сравнении с данными по станции «Моусон» за аналогичный период

Fig. 7. Variation graph for the period from 22.02.21 to 23.02.21 in comparison with data from the Australian «Mawson» station for the same period

Площадные магнитометрические работы. Магнитометр MMPOS-1 предназначен для измерения модуля геомагнитного поля и может использоваться как для проведения пешеходных съемок, так и в качестве стационарной вариационной станции. Маршрутные наблюдения проводили с шагом 10–25 м, учитывая сложности рельефа. Для исключения суточных вариаций во время проведения маршрутных исследований всегда синхронно устанавливали стационарный пункт. В общей сложности наблюдения на Вечернегорской площади проводили 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. 8–10).

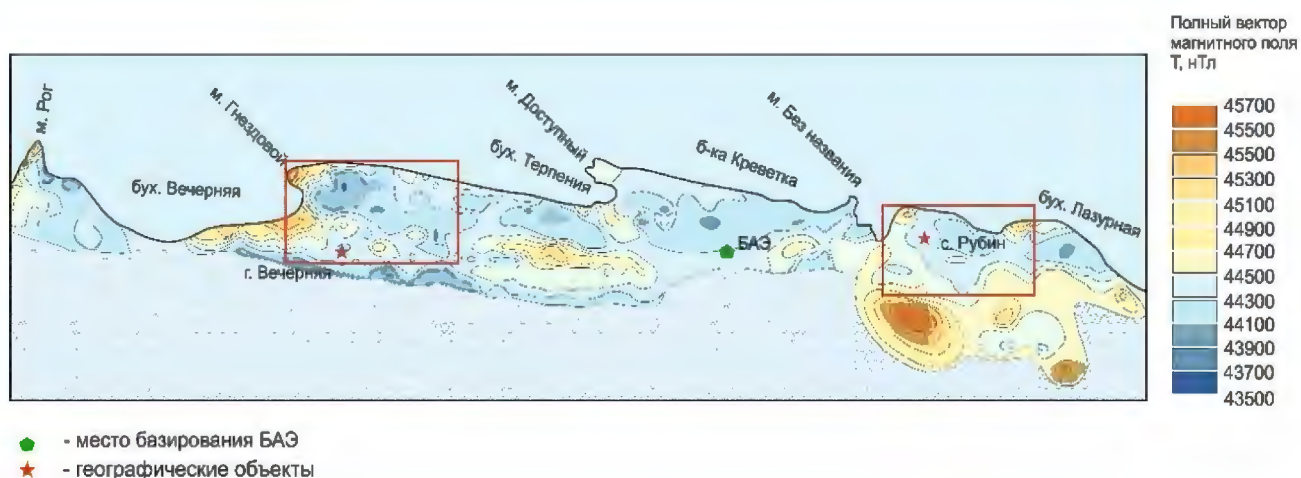


Рис. 8. Обзорная карта наблюденного геомагнитного поля T Вечернегорской площади

Fig. 8. Overview map of the observed geomagnetic field T of Vechernyaya Hill area

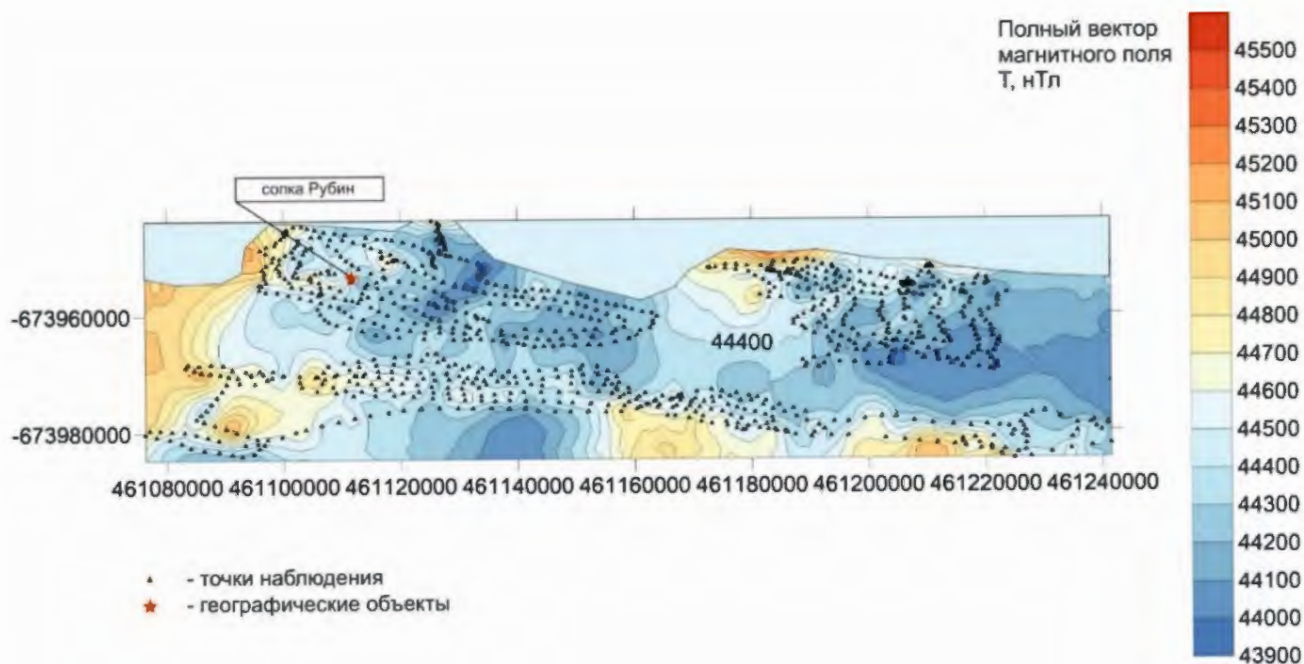


Рис. 9. Детализированный участок геомагнитного поля T в районе сопки «Рубин» с точками наблюдения

Fig. 9. Detailed area of the geomagnetic field T in the area of the «Rubin» hill with observation points

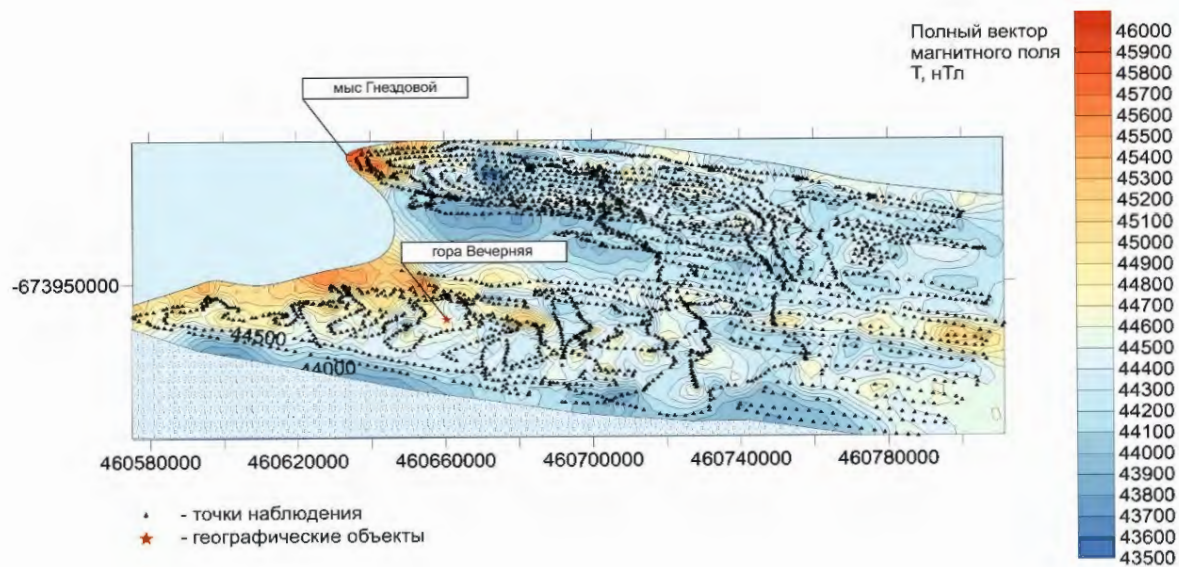


Рис. 10. Детализированный участок геомагнитного поля T в районе горы «Вечерняя» с точками наблюдения

Fig. 10. Detailed area of the geomagnetic field T in the area of the «Vechernyaya» Hill with observation points

Построенные карты в некоторой степени изменяют представление о геологическом строении территории, а также являются основой для выбора схемы заложения геодинамического полигона [5].

Заложение геодинамического полигона на Вечернегорской площади. Используя наработанные методики проведения полевых магнитометрических работ на территории Беларуси, а также ранее полученные геологические и геофизические данные, была выбрана следующая схема геодинамического полигона на Вечернегорской площади (рис. 11) [4, 6]. Неоднородное геологическое строение территории находит отражение в сложной структуре геофизических полей, в частности магнитного, с учетом радиоактивного и гравитационного. Предложенная проектная детализированная схема геодинамического полигона опирается на особенности геологического строения и аномальных значений геофизических полей района базирования БАЭ [7].

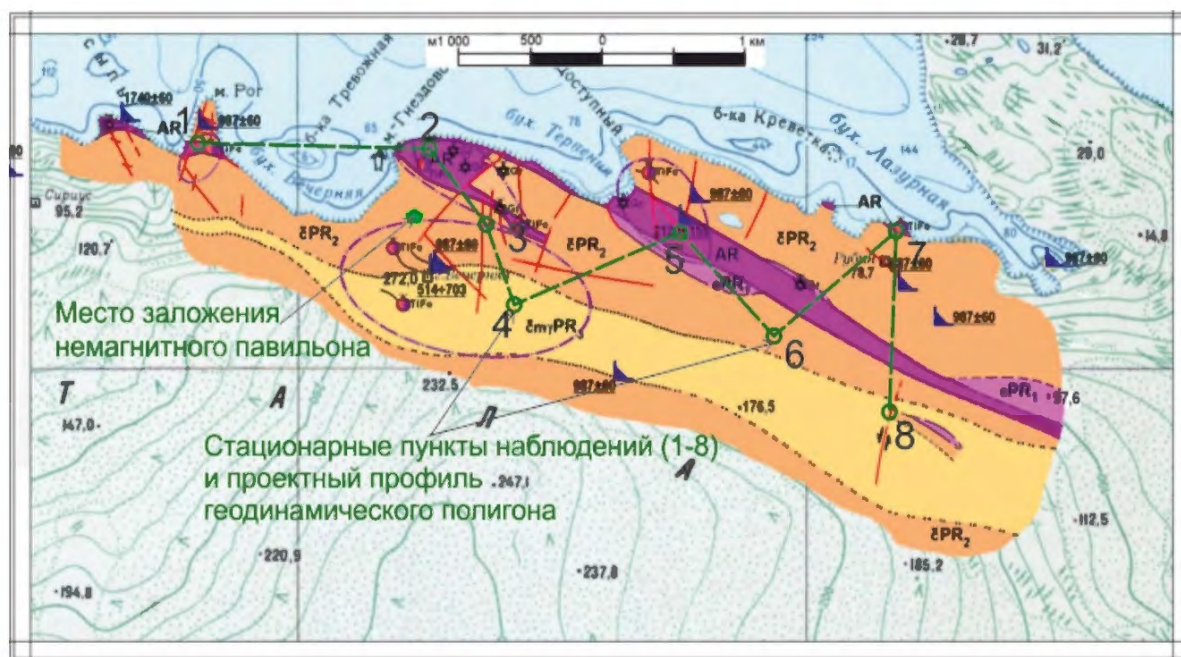


Рис. 11. Проектная детализированная схема геодинамического полигона Вечернегорской площади

Fig. 11. Project scheme of the geodynamic polygon of Vechernyaya Hill area

Стационарные пункты геофизических наблюдений заложены на различных геологических структурах изучаемой территории, включая разломные зоны, а также геологические структуры с наибольшими и наименьшими значениями наблюдаемого поля T . Данные исследования позволяют уточнить геологическое и тектоническое строение территории, а также создать банк данных по вариациям магнитного и других полей по различным временным периодам.

Закключение. Геомагнитные измерения на геодинамических полигонах Беларуси ведутся с целью обнаружения аномальных зон, установления их параметров и интенсивности протекающих в разломах современных тектонофизических процессов. Наблюдения за геомагнитным полем проводили с помощью двух видов магнитометрического оборудования: трехкомпонентный кварцевый магнитометр LEMI-018 и оверхаузерный магнитометр MMPOS-1. В процессе работы были установлены наиболее подходящие виды полевой съемки (маршрутная, площадная и стационарная) для каждого типа приборов. Опыт многократного проведения полевых наблюдений позволил наработать методики, успешно примененные на территории Вечернегорской площади Земли Эндерби (Восточная Антарктида).

Методики геомагнитной съемки, описанные в статье, позволяют изучить особенности глубинного строения на полигонах в Беларуси. Предварительные исследования на Вечернегорской площади свидетельствуют о возможности и целесообразности использования методики работ, апробированных на полигонах Беларуси.

Одним из наиболее эффективных методов изучения геологического строения антарктического 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 элементов разломно-интрузивной тектоники над различными геологическими телами, где фиксируются магнитные аномалии различной интенсивности и морфологии.

Рассмотренные методики полевых геомагнитных наблюдений на Вечернегорской площади демонстрируют еще более высокую эффективность, нежели на территории Беларуси, по причине отсутствия мощного осадочного чехла. Выход коренной породы на поверхность, к примеру, позволяет с более высокой точностью устанавливать контуры магнитовозмущающих тел.

Список использованных источников

1. Тектонофизическая природа вариаций во времени гравитационного и магнитного полей Новогрудско-Воложинско-Молодечненской аномалии на территории Беларуси / Р. Г. Гарецкий [и др.] // Литосфера. – 2019. – № 2 (51). – С. 45–54.
2. Изучение вариаций геофизических полей в зонах активных разломов Беларуси в экологическом аспекте // Р. Г. Гарецкий [и др.] // Мониторинг состояния окружающей среды в целях устойчивого развития. 25 лет Национальной системе мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 2018. – С. 129–133.
3. INTERMAGNET – the global network of observatories, monitoring the Earth's magnetic field [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.intermagnet.org/data-donnee/dataplot>. – Date of access: 10.12.2021.
4. Атлас Океанов. Антарктика / Главное управление навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации, Государственный научный центр Российской Федерации, Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт. – СПб., 2005. – 20 с.
5. 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., г. п. Нарочь, Беларусь, 26–29 мая 2014 г. – Минск : Экоперспектива, 2014. – С. 41–46.
6. Тектоническое районирование фундамента Земли Эндерби (Восточная Антарктида) / Р. Г. Гарецкий [и др.] // Современное состояние наук о Земле : материалы Междунар. конф., посв. памяти В. Е. Хаина. – М.: Изд-во МГУ, 2011. – С. 824–829.
7. Аномальное магнитное поле в зоне Белорусской антарктической станции / Г. И. Каратаев [и др.] // Литосфера. – 2018. – № 2 (49). – С. 137–144.

References

1. Garetsky R. G., Karataev G. I., Golobokov S. V., Myasnikov O. V., Sushkevich S. L., Khibiev A. K., Shablyka P. V. *Tektonofizicheskaya priroda variatsiy vo vremeni gravitatsionnogo i magnitnogo poley Novogrudsko-Volozhinskogo-Molodechnenskoj anomalii na territorii Belarusi* [Tectonophysical nature of variations in time of gravitational and magnetic fields of the Novogrudok-Volozhin-Molodechno anomaly on the territory of Belarus]. *Lithosphere*, 2019, no. 2(51), pp. 45–54. (in Russian)
2. Garetsky R. G., Karataev G. I., Myasnikov O. V., Khibiev A. K., Shablyka P. V. *Izuchenie variatsiy geofizicheskikh poley v zonah aktivnykh razlomov Belarusi v ekologicheskom aspekte* [Study of variations of geophysical fields in active fault zones of Belarus in the environmental aspect]. *Monitoring sostoyaniya okruzhayushey sredy v celyah ustoychivogo razvitiya. 25 let Nacionalnoy sisteme monitoringa okruzhayushey sredy v Respublike Belarus. Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii* [Proc. of the Int. sci. conf. 'Monitoring the state of the environment for sustainable development. 25 years of the National Environmental Monitoring System in the Republic of Belarus']. Minsk, 2018, pp. 129–133. (in Russian)
3. INTERMAGNET – the global network of observatories, monitoring the Earth's magnetic field. Available at: <https://www.intermagnet.org/data-donnee/dataplot> (accessed 10 December 2021).
4. *Atlas okeanov. Antarktika* [Atlas of the Oceans. Antarctica]. *Glavnoe upravlenie navigatsii i okeanografii Ministerstva oborony Rossijskoj Federatsii, Gosudarstvennyi nauchnyy tsentr Rossijskoj Federatsii, Arkticheskiy i Antarkicheskiy nauchno-issledovatel'skiy Institut* [Main Directorate of Navigation and Oceanography of the Ministry of Defense of the Russian Federation, State Scientific Center of the Russian Federation, Arctic and Antarctic Research Institute]. St. Petersburg, 2005, 20 p. (in Russian)
5. Garetsky 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 deyatel'nosti nacionalnykh ekspeditsiy. Materialy pervoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. of the 1st Int. sci. and pract. conf. 'Monitoring the state of the Antarctic natural environment and supporting the activities of national expeditions']. Minsk, 2014, pp. 41–46. (in Russian)
6. Garetsky R. G., Karataev G. I., Dankevich I. V., Myasnikov O. V. *Tektonicheskoe rayonirovanie fundamenta Zemli Enderbi (Vostochnaya Antarktida)* [Tectonic zoning of the basement of Enderby Land (East Antarctica)]. *Sovremennoe sostoyanie nauk o Zemle. Materialy Mezhdunarodnoy konferencii, posvyaschennoy pamyati V. E. Khaina* [Proc. of the Int. Conf. dedicated to the memory of V. E. Khaina 'Current state of Earth sciences']. Moscow, 2011, pp. 824–829. (in Russian)
8. Karataev G. I., Golobokov S. V., Shablyka P. V., Khibiev A. K. *Anomalnoe magnitnoe pole v zone Belorusskoy Antarkicheskoy stantsii* [Anomalous magnetic field in the area of the Belarusian Antarctic Station]. *Lithosphere*, 2018, no. 2 (49), pp. 137–144. (in Russian)

Информация об авторах

Хибиев Артур Курбанович – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: loter_mc@mail.ru

Шаблыко Павел Викентьевич – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: ecktobellum@gmail.com

Сушкевич Сергей Александрович – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: sergeysyshkevich@mail.ru

Шеметило Михаил Александрович – студент, Белорусский государственный университет, факультет географии и геоинформатики (ул. Ленинградская, 16, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: mishandrma@gmail.com

Information about the authors

Arthur K. Khibiyev – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: loter_mc@mail.ru

Pavel V. Shablyka – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: ecktobellum@gmail.com

Sergey L. Sushkevich – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: sergeysyshkevich@mail.ru

Mihail A. Shemyatsila – student, Belarusian State University, Faculty of Geography and Geoinformatics (16, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: mishandrma@gmail.com

УДК 624.131:551.345

*Поступила в редакцию 10.11.2023
Received 10.11.2023*

РАЗВИТИЕ ПОЛОЖЕНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ МЕРЗЛЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД И ГОРНЫХ ПОРОД

Г. П. Бровка

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье приведены математические модели для расчета температуры и теплоты фазового перехода связанной воды в лед, а также потоков влаги и водорастворимых соединений под воздействием градиентов температуры, гидростатического давления и концентрации водорастворимых соединений в промерзающих дисперсных средах. Показано, что определяющим фактором прочности засоленных горных пород при отрицательных температурах является содержание соответствующего количества незамерзшей воды независимо от того, чем оно обусловлено: температурой, концентрацией солей в поровом растворе или их совместным влиянием. Приведены принципы использования равновесной термодинамики, термодинамики необратимых процессов и теории дальнедействующих поверхностных сил для расчетов формирования прочностных свойств мерзлых пород.

Ключевые слова: физико-химическая механика мерзлых пород; фазовые переходы воды в лед; морозное пучение; прочность мерзлых засоленных пород.

Для цитирования. Бровка Г. П. Развитие положений физико-химической механики мерзлых дисперсных сред и горных пород // Природопользование. – 2023. – № 2. – 118–129.

DEVELOPMENT OF PHYSICAL AND CHEMICAL MECHANICS OF FROZEN DISPERSES MEDIA AND ROCKS

G. P. Brovka

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

Abstract. The article presents mathematical models for calculating of the temperature and heat of the phase transition of bound water into ice, as well as the flow of moisture and water-soluble compounds under the influence of temperature gradients, hydrostatic pressure and the concentration of water-soluble compounds in freezing dispersed media. It has been shown that the determining factor in the strength of saline rocks at negative temperatures is the content of the corresponding amount of unfrozen water, regardless of what causes it; temperature, salt concentration in the pore solution, or their combined influence. The principles of the use of equilibrium thermodynamics, the thermodynamics of irreversible processes and long-range surface forces for calculating of the formation of the strength properties of frozen rocks are presented.

Keywords: physical and chemical mechanics of frozen rocks; phase transitions of water into ice; frost heaving; strength of frozen saline rocks.

For citation. Brovka G. P. Development of physical and chemical mechanics of frozen disperses media and rocks. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 118–129.

Введение. Классическое определение физико-химической механики дисперсных систем, в свое время основанной П. А. Ребиндером, можно представить как раздел коллоидной химии, изучающий поверхностные явления в процессах структурообразования, деформации и разрушения дисперсных систем. При этом основное внимание уделяется процессам смачивания и сорбции на поверхностях раздела фаз, установления и прочности контактов межфазного взаимодействия в зависимости от компонентного состава и дисперсности исследуемых материалов.

На основании работ, выполненных в Институте природопользования НАН Беларуси и Тверском техническом университете (г. Тверь, Россия), под руководством известного ученого академика И. И. Лиштвана создана научная школа «Физико-химия и физико-химическая механика природных дисперсных систем». На ее становление оказали большое влияние работы ученых с мировым именем: А. В. Думанского, П. А. Ребиндера, Б. В. Дерягина, Ф. Д. Овчаренко, М. П. Воларовича, А. В. Лыкова,

И. В. Чураева, С. С. Корчунова, Н. И. Гамаюнова. Коллоидно-химические исследования развились в связи с задачами практики по созданию новых технологий добычи и переработки торфа и сапропеля.

Научным центром исследований в Институте природопользования в области физико-химической механики дисперсных систем стала созданная в 1974 г. И. И. Лиштваном лаборатория физико-химической механики природных дисперсных систем (далее – лаборатория ФХМПДС).

Эти исследования не ограничились только торфяной тематикой. В них были вовлечены и другие природные дисперсные системы, такие как бурый уголь, горючие сланцы, заторфованные грунты и почвы, а также горные породы из участков проходки шахтных стволов с использованием искусственного замораживания. Кроме традиционных подходов, характерных для классической физико-химической механики дисперсных систем, в лаборатории ФХМПДС с активным участием автора начали развиваться исследования, связанные с процессами тепло- и массопереноса, формированию структуры и деформационно-прочностных характеристик промерзающих грунтов и горных пород.

Выполненные исследования показали, что процессы формирования и преобразования структуры в дисперсных средах, как правило, происходят в неоднородных температурных и влажностных полях, а также с изменением концентрации водорастворимых соединений. При этом в дисперсной среде за счет неоднородных температурных и влажностных полей создаются градиенты гидростатического давления и механические напряжения, выполняющие функции, аналогичные внешним механическим воздействиям на локальные физико-химические процессы.

Особенно явно прослеживается влияние температурных полей на процессы деформации и формирования прочности в промерзающих грунтах и горных породах. В таких процессах проявляются определенные особенности, не характерные для области положительной температуры. Это позволяет отнести такие исследования к области физико-химической механики мерзлых пород. Указанное направление начало развиваться во второй половине XX в. и включает изучение процессов формирования прочности, деформации и разрушения промерзающих, мерзлых и оттаивающих грунтов и горных пород с учетом физикохимии поверхностных явлений в дисперсных средах, процессов тепло- и массопереноса, механики горных пород.

В свое время Б. А. Савельевым были сформулированы [1] основные направления физико-химической механики мерзлых пород:

- изучение влияния физико-химических факторов совместно с механическими и термическими воздействиями на формирование и изменение дисперсной системы (размер частиц, пористость), а также активности внутренних поверхностей раздела фаз;
- определение воздействия физико-химических факторов на формирование физического и химического состава, строение и заданные свойства породы;
- разработка новых путей упрочнения и ослабления мерзлых пород на основе физико-химической теории прочности.

Методологический подход. При развитии положений физико-химической механики мерзлых пород можно руководствоваться методологией термодинамики необратимых процессов [2, 3], позволяющей выделить термодинамические движущие силы переноса, сформулировать феноменологические уравнения и затем на основании законов сохранения энергии, массы и импульса сформировать систему дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса, в которых в качестве постоянных коэффициентов фигурируют характеристики материалов, определяемые экспериментально. В этом направлении, прежде всего, необходимо отметить теорию Онзагера, дающую возможность выявить взаимное влияние характеристик переноса различных движущих сил, так называемые перекрестные эффекты.

Несмотря на неоспоримые достижения теории переноса Онзагера, следует указать на ее определенную ограниченность и необходимость дальнейшего развития теоретических положений тепло- и массопереноса во влажных дисперсных средах. Ограниченность теории Онзагера заключается в формализованном подходе к выбору потоков и движущих сил переноса. Дальнейшее развитие теории переноса в дисперсных средах требует учета конкретных механизмов переноса.

Большое влияние на теорию процессов влагопереноса и структурообразования в дисперсных средах оказала теория расклинивающего давления Б. В. Дерягина и его последователей [4–8]. Теоретически и экспериментально было доказано наличие в тонких пленках жидкости, гидравлически связанной с объемной фазой избыточного давления, названного расклинивающим. Расклинивающее давление $\pi(h)$ можно трактовать как разность гидростатических давлений в тонкой пленке и в объемной фазе.

В работах Б. В. Дерягина, Н. В. Чураева, В. М. Муллера развиты теоретические положения действующих поверхностных сил и процессов переноса в капиллярно-пористых материалах [8–11]. Путем сочетания методов физической химии поверхностных явлений и неравновесной термодинамики в этих работах получены кинетические уравнения, описывающие процессы капиллярного осмоса, диф-

фузиофореза, термоосмоса, термофореза и термокристаллизационного течения незамерзающих прослоек при отрицательных температурах. Все указанные явления могут иметь место в природных дисперсных материалах. Однако они не исчерпывают всей сложности процессов тепло- и массопереноса в грунтах и горных породах. К тому же, теория поверхностных сил в настоящее время не дает возможности с достаточной степенью точности для конкретных дисперсных сред определить дальнodelействующие поверхностные силы и оценить их влияние на процессы тепло- и массопереноса, формирование деформационно-прочностного состояния мерзлых грунтов и горных пород. Поэтому конкретные проявления дальнodelействующих поверхностных сил можно оценивать с помощью равновесной термодинамики и учета гидродинамики тонких слоев жидкости. Как показано Н. В. Чураевым [11], для описания течения в тонких пленках и прослойках с учетом дальнodelействующих поверхностных сил или расклинивающего давления можно использовать законы гидродинамики, как и для объемной фазы жидкости. Гидродинамика тонких слоев жидкости позволяет на основании данных о структуре материала и толщине водных прослоек оценить коэффициенты переноса, связывающие потоки и движущие силы (коэффициенты гидродинамической проводимости).

В работах, выполненных в лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем, развивается подход, основанный на использовании локального термодинамического равновесия в тонких пленках воды в направлении, перпендикулярном к поверхности твердой дисперсной фазы, и расчета распределения гидростатического давления в различных направлениях как основной движущей силы влагопереноса.

Основные положения фазового равновесия и гидродинамики тонких слоев жидкости в мерзлых дисперсных средах можно сформулировать следующим образом:

1. Процессы тепломассопереноса во влажных дисперсных средах необходимо рассматривать с учетом непрерывного изменения термодинамических характеристик тонких слоев воды в направлении нормали к поверхности твердой дисперсной фазы.

$$\mu = \varepsilon - sT + pV_w = \varepsilon_0 - s_0T - p_0V_w, \quad (1)$$

$$p - p_0 = [(\varepsilon_0 - \varepsilon) - (s - s_0)T]/V_w = (f_0 - f)/V_w, \quad (2)$$

где μ – химический потенциал связанной воды; ε , s , p – локальные значения внутренней энергии, энтропии и гидростатического давления в тонкой пленке воды соответственно; ε_0 , s_0 , p_0 – значения внутренней энергии, энтропии и гидростатического давления в объемной фазе воды соответственно; T – абсолютная температура; V_w – удельный объем воды; f_0 – свободная энергия Гельмгольца в объемной фазе воды; f – свободная энергия Гельмгольца в тонкой пленке.

2. Следует строго разграничивать конвективные и диффузионные потоки вследствие различия их движущих сил и механизмов переноса. Потоки переносимых субстанций под действием градиентов гидростатического давления и поверхностных дальнodelействующих сил следует считать конвективными и для них можно использовать законы гидродинамики с учетом специфики тонких слоев жидкости. К диффузионным потокам следует относить только потоки, реализуемые за счет молекулярного переноса. Это, прежде всего, потоки за счет градиента концентрации и термодиффузионные потоки.

3. В основе расчета процессов переноса при отрицательных температурах лежит предположение о равенстве химического потенциала незамерзшей воды химическому потенциалу льда, обусловленного локальной температурой. Конвективный поток влаги в мерзлой среде определяется градиентами температуры, гидростатического давления и концентрации водорастворимых соединений в жидкой фазе. Диффузионный поток определяется в основном градиентами водорастворимых соединений.

4. Вблизи поверхности твердой дисперсной фазы гидростатическое давление в соответствии с выражением (2) может достигать значительной величины (10–100 МПа), и это необходимо учитывать в распределении водорастворимых соединений в тонких слоях воды, в частности, в тонких порах мембран, где свободная энергия Гемгольца f воды имеет сравнительно большие по абсолютной величине отрицательные значения, и вследствие этого повышенное гидростатическое давление будет препятствовать проникновению через поры мембраны водорастворимых соединений, имеющих большие радиусы гидратации.

5. Для информационного обеспечения математических моделей переноса в тонких слоях жидкости необходимо получать информацию о термодинамических характеристиках связанной воды в дисперсных средах (внутренней энергии, энтропии, химического потенциала) экспериментальными и расчетными методами, используя статическую термодинамику, молекулярную динамику и теорию дальнodelействующих поверхностных сил.

6. Для контроля и полноты математических моделей переноса в тонких слоях воды в дисперсных средах наряду с развиваемым подходом, характеризуемым гидродинамикой тонких слоев жидкости с учетом дальнедействующих поверхностных сил, рекомендуется использовать теорию Онзагера с конретизацией движущих сил и механизмов переноса в соответствии с их физическими аналогами.

С помощью развитого подхода получены новые научно-методические результаты, которые представлены ниже.

Фазовое равновесие воды в грунтах и горных породах при отрицательной температуре. Разработана термодинамическая модель фазового равновесия воды в органогенных природных дисперсных системах, основанная на учете энергетической и энтропийной составляющих химического потенциала влаги, а также на предположении о том, что при промерзании происходит частичная дегидратация агрегатов органоминерального скелета дисперсной системы и ледяные включения формируются в межагрегатном пространстве. На основании термодинамической модели получены формулы для расчета температуры и теплоты фазового перехода различных категорий влаги в лед с учетом их термодинамических параметров, определенных при положительных температурах.

В общем случае, когда имеет место энергетическое и энтропийное связывание воды в дисперсной системе, температуру T_Φ и теплоту Q_Φ фазовых переходов вода – лед, соответствующих влагосодержанию W , необходимо рассчитывать по формулам

$$T_\Phi(W) = \left[L + \Delta\mu - \left(\frac{\partial \Delta\mu}{\partial T} \right)_w \right] / \frac{L}{T_0} - \left(\frac{\partial \Delta\mu}{\partial T} \right)_w, \quad (3)$$

$$Q_\Phi = L - (C_v - C_l)(T_0 - T_\Phi) + \Delta\mu - \left(\frac{\partial \Delta\mu}{\partial T} \right)_w T_\Phi, \quad (4)$$

где L – теплота фазового перехода вода – лед в стандартных условиях, Дж/кг; C_v и C_l – удельные теплоемкости воды и льда соответственно, Дж/кг·К; T_0 – стандартная температура фазового перехода (273 К).

Данные формулы достаточно универсальны, они позволяют рассчитать температуру и теплоту фазовых переходов различных категорий связанной воды от чисто энергетической связи воды до чисто энтропийной связи, которая может иметь место при наличии в ней водорастворимых веществ. В температурном диапазоне 0...–250 °С отличие теплоты фазового перехода от L может превышать 10 %, и это необходимо учитывать в калориметрических опытах по определению количества незамерзшей воды.

Понижение температуры фазового перехода категории влаги, соответствующей ее количеству на твердую фазу материала W_n , и содержащую водорастворимые соединения с концентрацией C_m/W_n , будет определяться уравнением, полученным на предположении о аддитивности матричного и осмотического потенциалов незамерзшей воды в породе:

$$\Delta T_\Phi = f_1(W_n) + T_0 \left(\frac{RT}{L} \right) v_i \frac{M_v C_m}{M_c W_n}, \quad (5)$$

где $f_1(W_n)$ – функция зависимости понижения температуры фазовых переходов за счет матричного потенциала без наличия водорастворимых соединений; R – универсальная газовая постоянная; M_v и M_c – молекулярные массы воды и водорастворимого соединения соответственно; v_i – число ионов, на которые диссоциирует молекула водорастворимого соединения; C_m – концентрации водорастворимых соединений на твердую фазу материала; W_n – количество незамерзшей воды.

Для более точной оценки температуры фазового перехода связанной воды в лед необходимо учесть наличие в дисперсионной среде так называемого нерастворяющего объема для категории сильно связанной воды в тонкодисперсных материалах [12, 13]. В работе [14] на конкретном примере показано, что гидростатическое давление вблизи поверхности твердой фазы дисперсных сред может достигать значений порядка 109 Н/м². Это снижает концентрацию гидратированных ионов, имеющих больший объем, чем объем молекул воды вблизи поверхностей твердой фазы дисперсных сред. При учете нерастворяющего объема количество незамерзшей воды W_n необходимо заменить на $(W_n - W_{nr})$.

С помощью предложенного подхода можно оценить зависимость количества незамерзшей воды от температуры по значению температуры начала замерзания засоленной породы и зависимости количества незамерзшей воды от температуры для соответствующей незасоленной породы. Для этого определяют разность температуры начала замерзания засоленной и незасоленной пород $\Delta t_{зс}$, на кривой зависимости количества незамерзшей воды от температуры в незасоленной породе определяют

значение температуры, соответствующее определенному количеству незамерзшей воды $t_{ho}(W_H)$. Затем рассчитывают температуру, соответствующую определенному количеству незамерзшей воды в засоленной породе:

$$t_{hc}(W_H) = t_{ho}(W_H) + \Delta t_{sc} \left(\frac{W - W_{nr}}{W_H - W_{nr}} \right). \quad (6)$$

Значения параметра, соответствующего количеству влаги нерастворяющего объема W_{nr} , по предварительным оценкам составляют от 0,005 до 0,025 кг/кг. При этом минимальное количество нерастворяющего объема соответствует песчаным породам, а максимальное количество – глинистым.

О правомерности использования такого подхода свидетельствует сравнение (рис. 1) расчетных и экспериментальных данных по зависимости количества незамерзшей воды от температуры образцов засоленной аргиллитоподобной глины, полученных в лаборатории ФХМПДС [15].

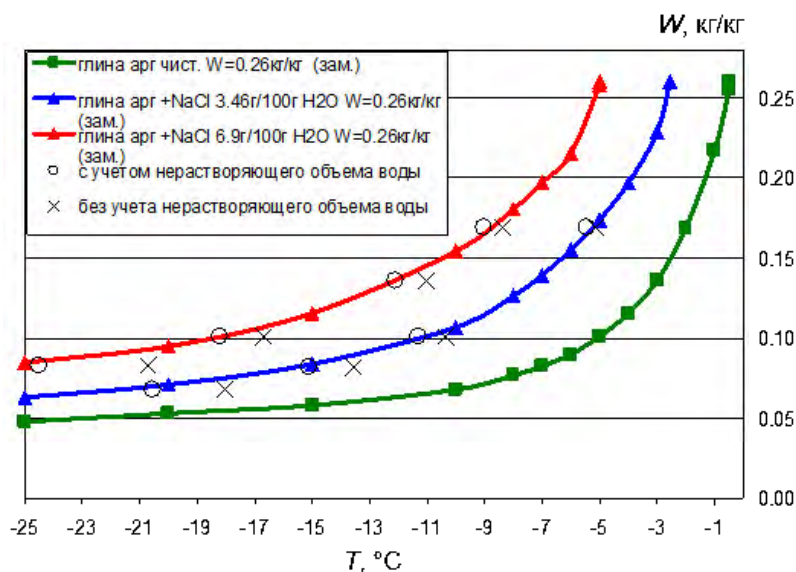


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные данные по зависимости количества незамерзшей воды в глине аргиллитоподобной при влагосодержании 0,26 кг/кг и различной степени засоления:

- – расчет с учетом нерастворяющего объема воды ($W_{nr} = 0,015$ кг/кг);
- × – расчет без учета нерастворяющего объема воды

Fig. 1. Experimental and calculated data on the ratio of intact water in argillite-like clay with a moisture content of 0.26 kg/kg and a different salinization degree:

- – calculation with an insoluble water volume ($W_{nr} = 0.015$ kg/kg);
- × – calculation excluding the insoluble water volume

Процессы переноса в грунтах и горных породах при отрицательной температуре. Несмотря на достаточно большой объем публикаций по вопросам переноса влаги при промерзании грунтов и почв, в настоящее время остаются дискуссионными вопросы переноса влаги, водорастворимых соединений и формирования сил морозного пучения в промерзающих породах. Б. В. Дерягиным и Н. В. Чураевым [10] на основании термодинамики необратимых процессов было показано, что основными движущими силами влагопереноса по незамерзающим прослойкам воды являются градиенты температуры и гидростатического давления согласно уравнению

$$q_s = -\alpha \rho_s \left(\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\rho_n L}{T} \frac{\partial T}{\partial X} \right), \quad (7)$$

где α – коэффициент гидродинамической проводимости незамерзающих прослоек; ρ_v и ρ_n – плотности воды и льда соответственно; P – гидростатическое давление; L – удельная теплота фазового перехода вода – лед; X – координата.

С помощью этого уравнения можно рассчитать и максимальное гидростатическое давление (давление пучения) в точке с температурой T , при котором прекращается миграция влаги. Однако в общих случаях в промерзающих породах на влагоперенос и давление пучения могут оказывать влияние передвижения включений льда и частиц породы в направлении, противоположном градиенту гидростатического давления, и наличие водорастворимых соединений.

Следует отметить, что аналогичное уравнение можно получить с учетом локального термодинамического равновесия, используя уравнения (1) и (2), линейного распределения температуры вдоль поверхности твердой фазы и линейного понижения химического потенциала льда $\Delta\mu_{\text{л}}$ с понижением температуры в соответствии с зависимостью

$$\Delta\mu_{\text{л}} = -L \frac{T_0 - T}{T_0}. \quad (8)$$

При наличии градиента гидростатического давления и с учетом формулы (7) миграционный поток в мерзлой зоне можно выразить уравнением

$$q_w = -a_w(W_{\text{н}}) \rho_{\text{ск}} \frac{dW_{\text{н}}}{dT} \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{T_0}{\rho_{\text{л}} L} \frac{\partial P}{\partial x} \right), \quad (9)$$

где $a_w(W_{\text{н}})$ – коэффициент диффузии незамерзшей воды.

Для простоты анализа полагается, что льдонакопление в мерзлой зоне происходит при температуре $T_{\text{л}}$, при которой гидростатическое давление, обусловленное перепадом температуры, превышает локальную структурную прочность материала $P_{\text{сц}}$. Распределение температуры в мерзлой зоне полагается линейным. При условии постоянства потока влаги в диапазоне от температуры начала заморозки T_{ξ} до температуры льдовыделения $T_{\text{л}}$ формула для выражения миграционного потока в мерзлой зоне будет иметь вид

$$q_w = - \left[\frac{(T_{\xi} - T_{\text{л}}) - (P_{\text{сц}} - P_0) \frac{T_0}{\rho_{\text{л}} L}}{\int_{T_{\xi}}^{T_{\text{л}}} \left[a_w(W_{\text{н}}) \frac{dW_{\text{н}}}{dT} \rho_{\text{ск}} \right] dT} \right] \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (10)$$

Выражение в скобках можно представить как коэффициент пропорциональности $K_{\text{м}}$ между градиентом температуры и потоком влаги из талой зоны в мерзлую, который можно назвать коэффициентом термовлагопроводности мерзлой зоны:

$$K_{\text{м}} = - \left[\frac{(T_{\xi} - T_{\text{л}}) - (P_{\text{сц}} - P_0) \frac{T_0}{\rho_{\text{л}} L}}{\int_{T_{\xi}}^{T_{\text{л}}} \left[a_w(W_{\text{н}}) \frac{dW_{\text{н}}}{dT} \rho_{\text{ск}} \right] dT} \right]. \quad (11)$$

Таким образом, миграционный поток из талой зоны в мерзлую при промерзании горной породы отсутствию внешних механических воздействий можно выразить формулой

$$q_w = -K_{\text{м}}(W_{x=\xi+0}) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (12)$$

где $K_{\text{м}}(W_{x=\xi+0})$ – коэффициент термовлагопроводности мерзлой зоны, являющийся функцией влагосодержания талой зоны на границе с мерзлой.

Это позволяет теоретически обосновать зависимость коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны $K_{\text{м}}$ от количества незамерзшей воды, разности значений температуры на границе промерзания и льдовыделения и прочности структурного сцепления мерзлого грунта.

В монографии автора [16] с помощью данного подхода обоснованы модели хрупкого и вязкого преобразования структуры горных пород при промерзании.

Развивая теорию переноса влаги и формирования градиента гидростатического давления, при наличии водорастворимых соединений в мерзлой породе и с учетом локального термодинамического равновесия по толщине незамерзающей прослойки воды, получена система феноменологических уравнений

$$q_v = -K_{\text{фм}} \left[\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\rho_l L}{T} \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_l R T \sum_i v_i \frac{M_v}{M_{ci}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_{mi}}{W_n} \right) \right] + \sum_i D_{\text{при}} \frac{\rho_v}{\rho_{ci}} \rho_{\text{ск}} W_n \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_{mi}}{W_{n'}} \right), \quad (13)$$

$$q_{ci} = q_v \frac{C_{mi}}{W} - D_{\text{при}} \rho_{\text{ск}} W_n \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_{mi}}{W_{n'}} \right), \quad (14)$$

где ρ_l , ρ_{ci} и $\rho_{\text{ск}}$ – плотность льда, водорастворимого соединения и скелета породы соответственно; W_n – количество незамерзшей воды в породе; $K_{\text{фм}}$ – коэффициент фильтрации мерзлой породы; $D_{\text{при}}$ – коэффициент диффузии водорастворимого соединения в поровом растворе.

Структура уравнения (13) свидетельствует о том, что плотность потока водорастворимых соединений определяется двумя различными механизмами: конвективным и диффузионным. Первый механизм соответствует переносу водорастворимых соединений вместе с потоком жидкости по незамерзающим прослойкам воды, второй – молекулярной диффузией водорастворимых соединений по этим же прослойкам. Движущими силами конвективного переноса являются градиент гидростатического давления, градиент температуры и градиент весовой концентрации водорастворимых соединений. При этом следует отметить, что при наличии водорастворимых соединений различного вида конвективная составляющая для каждого соединения будет определяться суммой градиентов концентраций всех соединений с учетом их диссоциации. Следует отметить, что уравнения (9) и (10) выведены при некоторых упрощениях, предполагающих аддитивность изменения термодинамических характеристик пленок незамерзшей воды от их толщины и наличия в них водорастворимых соединений, соответствующих свойствам идеальных растворов. При отклонении поровых растворов от свойств идеальности в формулах (5), (13) и (14) необходимо использовать криоскопические константы, соответствующие концентрациям конкретных растворов. Использование представленных формул позволяет в первом приближении выявить характер процессов влагопереноса, формирования напряженно-деформированного состояния и преобразования структуры в промерзающих горных породах.

Экспериментальные исследования фазового равновесия воды и процессов переноса в грунтах и горных породах при отрицательной температуре. Разработанные теоретические положения миграции влаги и преобразования структуры при промерзании дисперсных систем с легко деформируемым скелетом, учитывающие влияние прочностных и реологических характеристик скелета породы, геометрию порового пространства и наличие водорастворимых соединений, нашли подтверждение в выполненных соответствующих экспериментальных исследованиях. Было экспериментально установлено, что поток влаги из талой зоны в мерзлую при постоянной внешней нагрузке пропорционален градиенту температуры в мерзлой зоне (рис. 2). Это дает возможность ввести и обосновать феноменологический коэффициент термовлагопроводности мерзлой зоны K_m , численно равный плотности миграционного потока влаги при единичном градиенте температуры в мерзлой зоне как основной характеристики влагопереноса при промерзании.

Использование коэффициента термовлагопроводности мерзлой зоны позволило сформулировать задачу промерзания влажного грунта с учетом перераспределения влаги и морозного пучения [17].

Экспериментально установлено следующее:

- максимальные гидростатические давления при промерзании развиваются в системах, имеющих жесткую недеформируемую матрицу и тонкодисперсный наполнитель;
- наличие в поровом растворе водорастворимых соединений в промерзающей системе снижает миграцию влаги и развиваемые в мерзлой зоне гидростатические давления в той мере, в какой эти соединения понижают осмотический потенциал влаги, независимо от природы этих соединений.

Установленные закономерности можно использовать для регулирования процессов влагопереноса и пучения в промерзающих дисперсных средах.

Для выявления аналитической зависимости условно-мгновенной прочности на одноосное сжатие от количества незамерзшей воды глины аргиллитоподобной сотрудниками лаборатории ФХМПДС были получены данные о зависимости количества незамерзшей воды от температуры для образцов

с различной степенью засоленности и проведена статистическая обработка экспериментальных результатов с получением параметров указанной зависимости [18]. При этом установлено, что наиболее адекватно можно аппроксимировать эту зависимость с помощью степенной функции вида

$$P = \frac{A}{W_n}, \quad (15)$$

где P – прочность, МПа; A – постоянная, зависящая от общего влагосодержания глины аргиллитоподобной, МПа; W_n – количество незамерзшей воды, кг/кг; n – показатель степени.

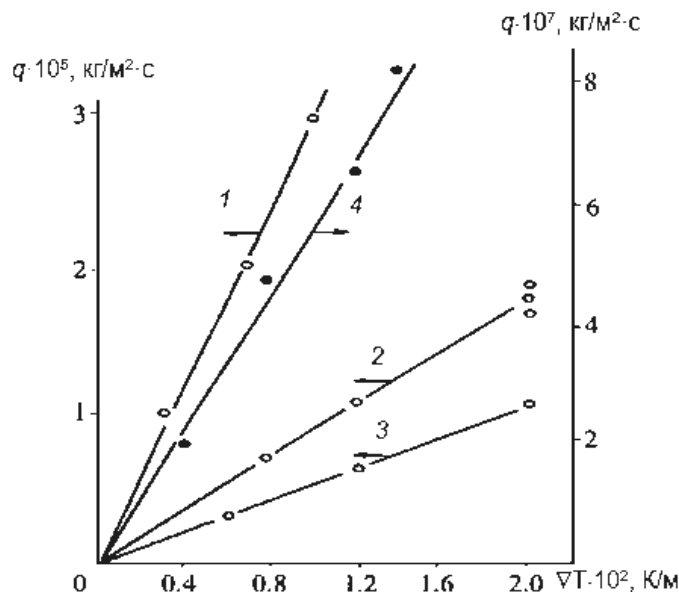


Рис. 2. Зависимость миграционного потока от градиента температуры в мерзлой зоне низинного торфа:
 1 – $W = 3,02$ кг/кг, $\rho_{sk} = 160$ кг/м³; 2 – $W = 2,3$ кг/кг, $\rho_{sk} = 175$ кг/м³; 3 – $W = 2,3$ кг/кг, $\rho_{sk} = 175$ кг/м³;
 4 – кварцевые волокна

Fig. 2. Migration flow depends on the temperature gradient in the frozen zone of the lowland peat:
 1 – $W = 3.02$ kg/kg, $\rho_{sk} = 160$ kg/m³; 2 – $W = 2.3$ kg/kg, $\rho_{sk} = 175$ kg/m³; 3 – $W = 2.3$ kg/kg, $\rho_{sk} = 175$ kg/m³;
 4 – quartz fibers

На рис. 3 представлена анализируемая зависимость, показанная сплошной линией, и экспериментальные точки, полученные при различных параметрах засоления и температуры, для глины аргиллитоподобной при влагосодержании 0,26 кг/кг.

Аналогичные зависимости получены для глины аргиллитоподобной при значениях влагосодержания 0,17 кг/кг ($n = 1,76$; $A = 0,039$ МПа) и 0,21 кг/кг ($n = 1,35$; $A = 0,213$ МПа).

Ранее в лаборатории ФХМПДС было также установлено [19, 20], что сопротивление сдвигу засоленного суглинка, определенного при различной температуре и различной степени засоленности, но с равным количеством незамерзшей воды, практически совпадают. При этом зависимость сопротивления сдвигу от количества незамерзшей воды удовлетворительно аппроксимируется зависимостью такого же типа, как и для аргиллитоподобной глины с показателем степени, равным 3, при значении постоянной $A = 3,6 \cdot 10^2$ Па. Эти данные представлены на рис. 4.

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных исследований и их анализа установлено, что определяющим фактором прочности горных пород при отрицательных температурах является содержание соответствующего количества незамерзшей воды вне зависимости от того, чем оно обусловлено: температурой, концентрацией солей в поровом растворе или их совместным влиянием. Такой подход позволяет оптимизировать многофакторные экспериментальные исследования прочности на одноосное сжатие мерзлых глинистых пород, уменьшая трудоемкость проводимых исследований без снижения их точности и достоверности.

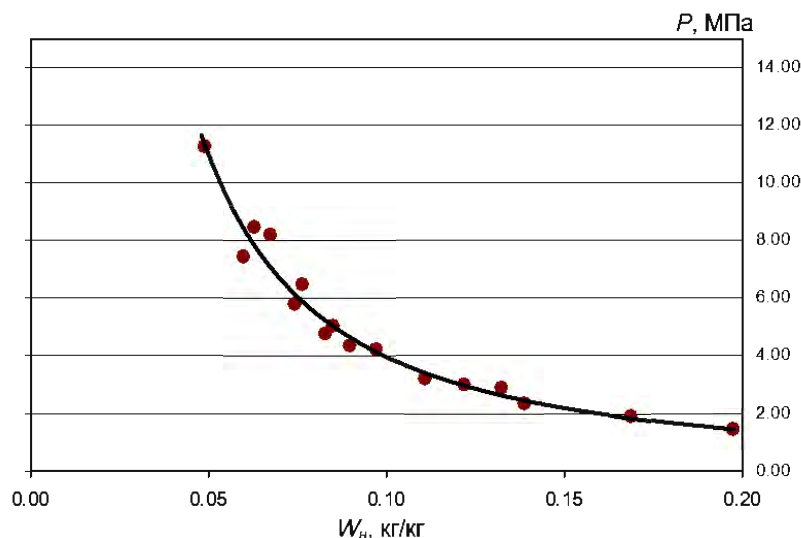


Рис. 3. Аппроксимация зависимости условно-мгновенной прочности на одноосное сжатие от количества незамерзшей воды для глины аргиллитоподобной при влагосодержании 0,26 кг/кг ($n = 1,47$; $A = 0,134$ МПа)

Fig. 3. Approximation of the dependence of the conditional instantaneous strength on one-axis compression on the amount of frozen water for argillite-like clay with a moisture content of 0.26 kg/kg ($n = 1.47$; $A = 0.134$ MPa)

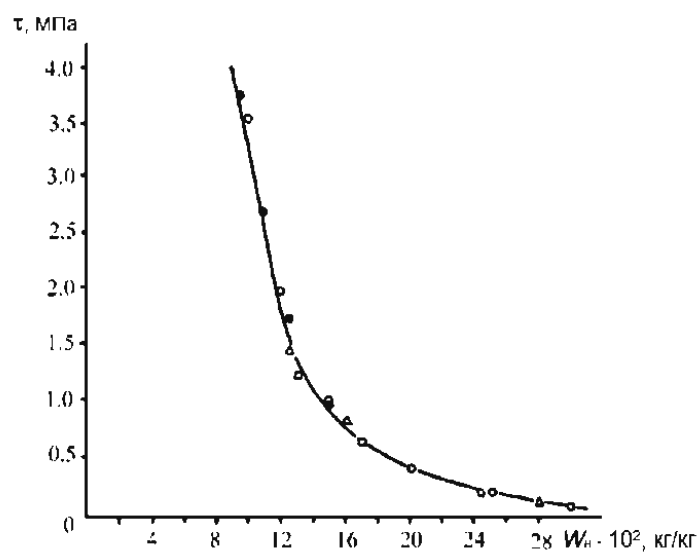


Рис. 4. Зависимость сопротивления сдвигу τ мерзлого суглинка от содержания незамерзшей воды:

● Δ □ – экспериментальные данные для образцов с различной исходной концентрацией

порового раствора; ○ – расчетные данные по зависимости; $\tau = \frac{A}{W_n^3}$

Fig. 4. Dependence of the shear resistance of τ freezing loam on the content of frozen water:

● Δ □ – experimental data for samples with different reference concentrations pore solution;

○ – calculated dependency data; $\tau = \frac{A}{W_n^3}$

Направления использования результатов исследования. Одним из основных направлений использования новых полученных научно-методических результатов является разработка обоснования проектов проходки шахтных стволов калийных рудников в сложных гидрогеологических условиях с применением искусственного замораживания массива горных пород в районе проходки. Необходимо отметить, что проходка шахтных стволов калийных рудников в сложных гидрогеологических условиях, как правило, осуществляется с применением искусственного замораживания. При этом расходуется значительное количество энергетических ресурсов на обеспечение температурных режимов, используются достаточно дорогостоящие материалы и оборудование. Недостаточно точный и достоверный прогноз температурного режима и прочностных свойств мерзлых пород не позволяет в полной мере минимизировать экономические затраты на обеспечение режимов искусственного замораживания горных пород без снижения рисков безаварийных ситуаций при проходке шахтных стволов.

В указанном направлении за последние годы лабораторией ФХМПДС выполнены НИР для обоснования проектов строительства девяти калийных рудников: в Беларуси – 5, России – 2, Туркменистане – 1, Таиланде – 1.

На базе разработанных математических моделей, конечно-разностных схем и алгоритмов задач теплопереноса с фазовыми переходами создана прикладная программа CRYOS3D для расчета процессов замораживания грунтов на участке заложения шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях. Эта программа позволяет вести расчет и осуществлять визуализацию трехмерных процессов замораживания горных пород с последующей оптимизацией режима замораживания с целью экономии энергетических ресурсов и сокращения времени замораживания (программные средства зарегистрированы в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь и сертифицированы в Российской Федерации).

С 2020 по 2025 г. лаборатория ФХМПДС участвует в выполнении задания «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», где предполагается использовать наработки лаборатории в области физико-химической механики мерзлых пород.

Перспективы. В настоящее время в целях развития положений физико-химической механики мерзлых пород в лаборатории ФХМПДС создана приборно-методическая база. Это стало возможно благодаря усилиям группы сотрудников, включающей одного доктора технических наук (Г. П. Бровка), одного кандидата технических наук (старший научный сотрудник И. В. Дедюля, занимается приборно-методическим обеспечением исследования деформационно-прочностных характеристик мерзлых грунтов и горных пород), одного кандидата геолого-минералогических наук (старший научный сотрудник А. А. Мурашко, занимается исследованием процессов преобразования структуры при промерзании грунтов и горных пород, обучается в докторантуре и работает над докторской диссертацией на тему «Оценка структурной и деформационно-прочностной устойчивости дисперсных горных пород при естественном промерзании и искусственном замораживании») и трех научных сотрудников, работающих над кандидатскими диссертациями (К. А. Агутин – морозное пучение и процессы переноса влаги и солей при промерзании грунтов и горных пород, А. Г. Бровка – влияние фазового состава воды на теплофизические и прочностные характеристики промерзающих грунтов и горных пород, И. Н. Дорожок – процессы переноса тепла, влаги и водорастворимых сорбируемых соединений в природно-территориальных комплексах). Следует также отметить, что в создании приборно-методической базы по исследованию деформационно-прочностных характеристик мерзлых грунтов и горных пород существенный вклад внес ушедший из жизни в 2022 г. кандидат технических наук И. И. Романенко.

Приборно-методическая база и направления исследований группы указанных сотрудников создают предпосылки для перспективного развития положений физико-химической механики мерзлых пород по вопросам фазового состава воды, переноса тепла, влаги, водорастворимых соединений, морозного пучения, формирования прочностных характеристик и преобразования структуры при промерзании грунтов и горных пород, а также формирования в указанном направлении научной школы.

Заключение. Теоретический анализ и экспериментальные исследования показали, что в основе положений формирования структуры и деформационно-прочностных свойств промерзающих горных пород, являющихся объектом и предметом исследований физико-химической механики указанных пород, лежат, во-первых, в статических условиях – оценка фазового состава воды в мерзлых породах в зависимости от различных факторов, включая термодинамические характеристики связанной воды, температуру, концентрацию водорастворимых соединений и гидростатическое давление, а во-вторых, в динамических условиях – оценка базируется на основных движущих силах формирования свойств мерзлых пород (градиентах температуры, гидростатического давления, концентрации водорастворимых соединений; при этом основная инициатива принадлежит градиенту температуры). При развитии

указанных положений необходимо использовать в тесном взаимодействии комплекс научных направлений, включающий равновесную и неравновесную термодинамику, современную физикохимию поверхностных явлений, учитывающую дальнodelствующиe поверхностные силы, теорию тепло- и массообмена в дисперсных средах и механику горных пород.

Список использованных источников

1. Савельев, Б. А. Физико-химическая механика мерзлых пород / Б. А. Савельев. – М. : Недра, 1989. – 211 с.
2. Де Грот, С. Р. Неравновесная термодинамика / С. Р. Де Грот, П. Мазур. – М. : Мир, 1966. – 456 с.
3. Хаазе, Р. Термодинамика необратимых процессов / Р. Хаазе. – М. : Мир, 1967. – 554 с.
4. Дерягин, Б. В. Смачивающие пленки / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев. – М. : Наука, 1984. – 160 с.
5. Дерягин, Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. – М. : Наука, 1985. – 396 с.
6. Чураев, Н. В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н. В. Чураев. – М. : Химия, 1990. – 272 с.
7. Дерягин, Б. В. Упругие свойства пен и тонких пленок / Б. В. Дерягин, Е. В. Обухов // Журн. физ. химии. – 1936. – Т. 7. – С. 207–214.
8. Дерягин, Б. В. Свойства тонких слоев жидкостей и их влияние на взаимодействие твердых поверхностей / Б. В. Дерягин, М. М. Кусаков // Изв. АН СССР. Сер. хим. – 1936. – № 5. – С. 741–753.
9. Дерягин, Б. В. К вопросу об определении понятия и величины расклинивающего давления и его роли в статике и кинетике тонких слоев жидкостей / Б. В. Дерягин // Коллоид. журн. – 1955. – Т. 17, № 3. – С. 207–214.
10. Дерягин, Б. В. Смачивающие пленки / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев. – М. : Наука, 1984. – 160 с.
11. Чураев, Н. В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н. В. Чураев. – М. : Химия, 1990. – 272 с.
12. Вода в дисперсных системах / Б. В. Дерягин [и др.]. – М. : Химия, 1989. – 288 с.
13. Злочевская, Р. И. Электроповерхностные явления в глинистых породах / Р. И. Злочевская, В. А. Королев. – М. : Изд-во МГУ, 1988. – 177 с.
14. Тепло- и массоперенос в природных дисперсных системах при промерзании / Г. П. Бровка. – Минск : Наука и техника, 1991. – 191 с.
15. Бровка, А. Г. Влияние концентрации соли в поровом растворе глины аргиллитоподобной на температуру начала замерзания и зависимость количества незамерзшей воды от температуры / А. Г. Бровка, Г. П. Бровка, И. В. Дедюля // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 1. – С. 14–23.
16. Бровка, Г. П. Взаимосвязанные процессы тепло- и массопереноса в природных дисперсных средах / Г. П. Бровка. – Минск : Беларуская навука, 2011. – 363 с.
17. Бровка, Г. П. Математические модели и методы экспериментального исследования для обеспечения моделирования процессов пучения и преобразования структуры при промерзании грунтов / Г. П. Бровка, К. А. Агютин, А. А. Мурашко // Инженерная геология. – 2021. – Т. 16, № 4. – С. 62–71.
18. Бровка, А. Г. Зависимость прочностных характеристик глины аргиллитоподобной от количества незамерзшей воды / А. Г. Бровка, И. В. Дедюля, А. А. Мурашко // Природопользование. – 2021. – № 2. – С. 96–105.
19. Бровка, Г. П. Сопротивление сдвигу мерзлых засоленных грунтов / Г. П. Бровка, И. И. Романенко // Изв. вузов. Горный журн. – 1989. – № 4. – С. 30–33.
20. Бровка, Г. П. Расчеты температурного режима и энергетических затрат при формировании ледопородных ограждений для проходки шахтных стволов / Г. П. Бровка [и др.] // Инженерная геология. – 2021. – Т. 16, № 1. – С. 74–84.

References

1. Savelyev B. A. *Fiziko-himicheskaya mekhanika merzlykh porod* [Physical and chemical mechanics of frozen rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1989, 211 p. (in Russian)
2. De Groot S. R., Mazur P. *Neravnovesnaya termodinamika* [Nonequilibrium thermodynamics]. Moscow, Mir Publ., 1966, 456 p. (in Russian)
3. Khaaze R. *Termodinamika neobratimyyh processov* [Thermodynamics of irreversible processes]. Moscow, Mir Publ., 1967, 554 p. (in Russian)
4. Deryagin B. V., Churayev N. V. *Smachivayushchie plenki* [Wetting films]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 160 p. (in Russian)
5. Deryagin B. V., Churayev N. V., Muller V. M. *Poverhnostnye sily* [Superficial forces]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 396 p. (in Russian)
6. Churaev N. V. *Fizikohimiya processov massoperenosa v poristyyh telakh* [Physico-chemical processes of massopropenosa in porous bodies]. Moscow, Khimiya Publ., 1990, 272 p. (in Russian)
7. Deryagin B. V., Obukhov E. V. *Uprugie svojstva pen i tonkih plenok* [Elastic properties of foam and thin films]. *J. Physical Chemistry*, 1936, vol. 7, pp. 207–214. (in Russian)

8. Deryagin B. B., Kusakov M. M. *Svojstva tonkih sloev zhidkostej i ih vliyanie na vzaimodejstvie tverdyh poverhnostej* [Properties of thin layers of liquids and their influence on the interaction of solid surfaces]. *Izvestiya of the AS of USSR. Ser. khim.*, 1936, no. 5, pp. 741–753. (in Russian)
9. Deryagin B. V. *K voprosu ob opredelenii ponyatiya i velichiny rasklinivayushchego davleniya i ego roli v statike i kinetike tonkih sloev zhidkostej* [To the question of the definition of the concept and the value of the expanding pressure and its role in the statics and kinetics of thin layers of liquids]. *J. Colloid*, 1955, vol. 17, no. 3, pp. 207–214. (in Russian)
10. Deryagin B. V., Churaev N. V. *Smachivayushchie plenki* [Wetting films]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 160 p. (in Russian)
11. Churaev N. V. *Fizikohimiya processov massoperenosa v poristyyh telakh* [Physico-chemical processes of massoporens in porous bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 272 p. (in Russian)
12. Deryagin B. V., Churaev N. V., F. D. Ovcharenko [et al.]. *Voda v dispersnyh sistemah* [Water in disperse systems]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 288 p. (in Russian)
13. Zlochevskaya R. I., Korolev V. A. *Elektropoverhnostnye yavleniya v glinistyyh porodah* [Electrosurface phenomena in clay rocks]. Moscow, MSU Publ., 1988, 177 p. (in Russian)
14. Brovka G. P. *Teplo- i massoperenos v prirodnyh dispersnyh sistemah pri promerzanii* [Heat and mass transfer in natural disperse systems during freezing]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1991, 191 p. (in Russian)
15. Brovka A. G., Brovka G. P., Dedulia I. V. *Vliyanie koncentracii soli v porovom rastvore gliny argillitopodobnoy na temperaturu nachala zamerzaniya i zavisimost' kolichestva nezamerzshey vody ot temperatury* [Influence of salt concentration in pore mud argillite-like clay on the temperature of the beginning of freezing and dependence of the amount of frozen water on the temperature]. *Mining Mechanics and Engineering*, 2022, no. 1, pp. 14–23. (in Russian)
16. Brovka G. P. *Vzaimosvyazannyye processy teplo- i massoperenosa v prirodnyh dispersnyh sredah* [Interconnected processes of heat and mass transfer in natural disperse media]. Minsk, Belaruskaya navuka, 2011, 363 p. (in Russian)
17. Brovka G. P., Agutin K. A., Murashko A. A. *Matematicheskie modeli i metody eksperimental'nogo issledovaniya dlya obespecheniya mo-delirovaniya processov pucheniya i preobrazovaniya struktury pri promerzanii gruntov* [Mathematical models and experimental research methods for permutatation and structural transformation in soil freezing]. *Engineering Geology*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 62–71. (in Russian)
18. Brovka A. G., Dedulia I. V., Murashko A. A. *Zavisimost' prochnostnykh harakteristik gliny argillitopodobnoy ot kolichestva nezamerzshey vody* [Dependence of strength characteristics of argillite-like clay on the amount of non-vile water]. *Nature Management*, 2021, no. 2, pp. 96–105. (in Russian)
19. Brovka G. P., Romanenko I. I. *Soprotivlenie sdvigu merzlykh zasolennykh gruntov* [Resistance to displacement of frozen saline soils]. *Izvestiya Vuzov. Gornyy zhurnal = News of Universities. J. Mining*, 1989, no. 4, pp. 30–33. (in Russian)
20. Brovka G. P., Muchko M. V., Agutin K. A., Lipnickij N. A. *Raschety temperaturnogo rezhima i energeticheskikh zatrat pri formirovaniy ledoporodnykh ograzhdenij dlya prohodki shahtnykh stvolov* [Calculations of temperature and energy costs in the formation of ice-propelled fences for mining shafts]. *Engineering Geology*, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 74–84. (in Russian)

Информация об авторе

Бровка Геннадий Петрович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: brovka_gp@tut.by

Information about the author

Gennady P. Brovka – D. Sc. (Technical), Associate Professor, Chief Scientific Associate, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: brovka_gp@tut.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-130-140>
УДК 553.97; 528.88

Поступила в редакцию 23.09.2023
Received 23.09.2023

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВИТЕБСКОЙ, ГРОДНЕНСКОЙ И МИНСКОЙ ОБЛАСТЕЙ БЕЛАРУСИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

Ю. Ю. Навоша, О. Н. Ратникова, И. В. Агейчик

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. На основе анализа спутниковых снимков территорий торфяных месторождений Витебской, Гродненской и Минской областей Беларуси и разработанной в ГИС формате базы данных выполнена оценка их современного состояния. Получены актуальные данные об использовании площадей торфяных месторождений, об их качественных и количественных характеристиках, позволяющие оценить оставшиеся запасы торфа. Всего проанализировано в Витебской области – 1521, в Гродненской области – 393 и в Минской области – 1197 разведанных торфяных месторождений (с площадью более 10 га), общая площадь которых составляет 362,0; 165,1 и 575,2 тыс. га соответственно. Оставшиеся геологические запасы торфа составляют в Витебской области – 1120,9 млн т, в Гродненской области – 252,7 млн, в Минской области – 1062,5 млн т.

Анализ спутниковых снимков территорий торфяных месторождений исследуемых областей показал, что в ненарушенном состоянии в Витебской области находится 55 % площадей торфяных месторождений, в Гродненской и Минской – по 17 %. Основная часть в Гродненской и Минской областях (54 и 49 % соответственно) – это осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования, в Витебской области таких площадей 9 %. Во всех трех областях находится 129 месторождений с истощенными запасами торфа и 926 месторождений с геологическими запасами менее 40 тыс. т (запасы, не представляющие интереса для комплексной переработки торфа).

Ключевые слова: торфяное месторождение; болото; торф; дистанционное зондирование Земли.

Для цитирования. Навоша Ю. Ю., Ратникова О. Н., Агейчик И. В. Оценка современного состояния торфяных месторождений Витебской, Гродненской и Минской областей Беларуси на основе анализа спутниковых снимков // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 130–140.

ASSESSMENT OF THE CURRENT STATE OF THE PEAT DEPOSITS OF VITEBSK, GRODNO AND MINSK REGIONS OF BELARUS BASED ON THE ANALYSIS OF SATELLITE IMAGES

Yu. Yu. Navosha, O. N. Ratnikova, I. V. Ageichik

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

Abstract. Based on the analysis of satellite images of the territories of peat deposits in Vitebsk, Grodno and Minsk regions of Belarus and the database developed in GIS format, the assessment of their current state was carried out. Actual data on the peat deposits area use, their qualitative and quantitative characteristics have been obtained, which allows the estimation of the remaining peat reserves. The total analyzation in Vitebsk region – 1521, in Grodno region – 393 and in Minsk region – 1197 explored peat deposits (with an area of more than 10 hectares), the total area of which is 362.0; 165.1 and 575.2 thousand hectares, respectively. The remaining geological reserves of peat in Vitebsk region are 1120.9 million tons, in Grodno region – 252.7 million, in Minsk region – 1062.5 million tons. Analysis of satellite images of the territories of the peat deposits of the studied regions showed that 55 % of the areas of peat bogs in Vitebsk region are in undisturbed condition (natural peat bogs).

Keywords: peatland; bog; peat; space sensing.

For citation. Navosha Yu. Yu., Ratnikova O. N., Ageichik I. V. Assessment of the current state of the peat deposits of Vitebsk, Grodno and Minsk regions of Belarus based on the analysis of satellite images. *Nature Management*, 2023, no. 2. pp. 130–140.

Введение. В рамках задания «Выполнить анализ современного состояния торфяных месторождений на основе данных дистанционного зондирования Земли и разработать атлас торфяных месторождений Республики Беларусь» ГНТП «Природопользование и экологические риски» на 2016–2020 годы подпрограммы 01 «Рациональное природопользование и инновационные технологии глубокой переработки природных ресурсов» на основании инвентаризации и оценки современного состояния территории торфяных месторождений Брестской, Гомельской и Могилёвской областей по спутниковым снимкам и разработки базы данных был выполнен анализ состояния торфяных месторождений Брестской, Гомельской и Могилёвской областей Беларуси. Настоящая статья является продолжением анализа состояния торфяных месторождений Республики Беларусь, выполняемая в рамках задания ЗТ.2.3 «Завершить работы по составлению атласа торфяных месторождений Республики Беларусь на основе анализа их современного состояния по данным дистанционного зондирования Земли (Витебская, Гродненская, Минская области)» государственной научно-технической программы «Зеленые технологии ресурсопользования и экобезопасности», 2021–2025 годы.

Основная часть. Для анализа территории торфяных месторождений в зависимости от фактического состояния и вида использования в хозяйственной и иной деятельности были выделены следующие категории участков торфяных месторождений, которые можно определить путем дешифрирования спутниковых снимков: естественное болото (ненарушенное торфяное месторождение); нарушенное болото с кустарниковой растительностью; торфяное месторождение, покрытое лесной растительностью; осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования; разрабатываемые участки.

Естественные болота сохраняются в естественном ненарушенном состоянии. Допускается ограниченное использование естественных болот для осуществления отдельных видов хозяйственной и иной деятельности, не оказывающих вредного воздействия на болотные экологические системы (ведение лесного хозяйства, экологический туризм, сбор, заготовка дикорастущих растений и (или) их частей, сенокошение, ведение охотничьего хозяйства и охота, ведение рыболовного хозяйства и рыболовство и др.), при условии соблюдения режима охраны и использования естественных болот.

Нарушенные болота (покрытые древесно-кустарниковой растительностью) используются для ведения лесного хозяйства, сбора, заготовки дикорастущих растений и (или) их частей, сенокошения, ведения охотничьего хозяйства и охоты, ведения рыболовного хозяйства и рыболовства, осуществления других видов хозяйственной и иной деятельности.

Разрабатываемые участки – для добычи торфа для нужд топливно-энергетического сектора экономики и для производства грунтов различного назначения, удобрений, гуминовых препаратов, особо ценных видов торфа (верхового малоразложившегося торфа для гидролизного производства; битуминозного торфа для битумного производства; торфа, пригодного для использования в качестве сырья для лечебных целей).

Осушенные земли с торфяными почвами используются для ведения сельского хозяйства.

Предложенные категории участков состояния торфяных месторождений качественно отличаются способом использования ресурсов торфяного месторождения, позволяют количественно оценить изменение геологических запасов торфа, общее состояние торфяного фонда Республики Беларусь.

Предварительно была выполнена работа по созданию базы данных контуров торфяных месторождений, их топографической привязке и нормированию по площадям, полученным по результатам наземной разведки торфяных месторождений. Путем экспертного анализа спутниковых снимков земной поверхности в пределах полученных контуров торфяных месторождений была создана база данных участков месторождения разного направления использования.

На основании инвентаризации и детальной оценки современного состояния территорий торфяных месторождений Витебской, Гродненской и Минской областей по спутниковым снимкам и разработанной базы данных торфяных месторождений выполнен анализ состояния торфяного фонда Витебской, Гродненской и Минской областей Беларуси.

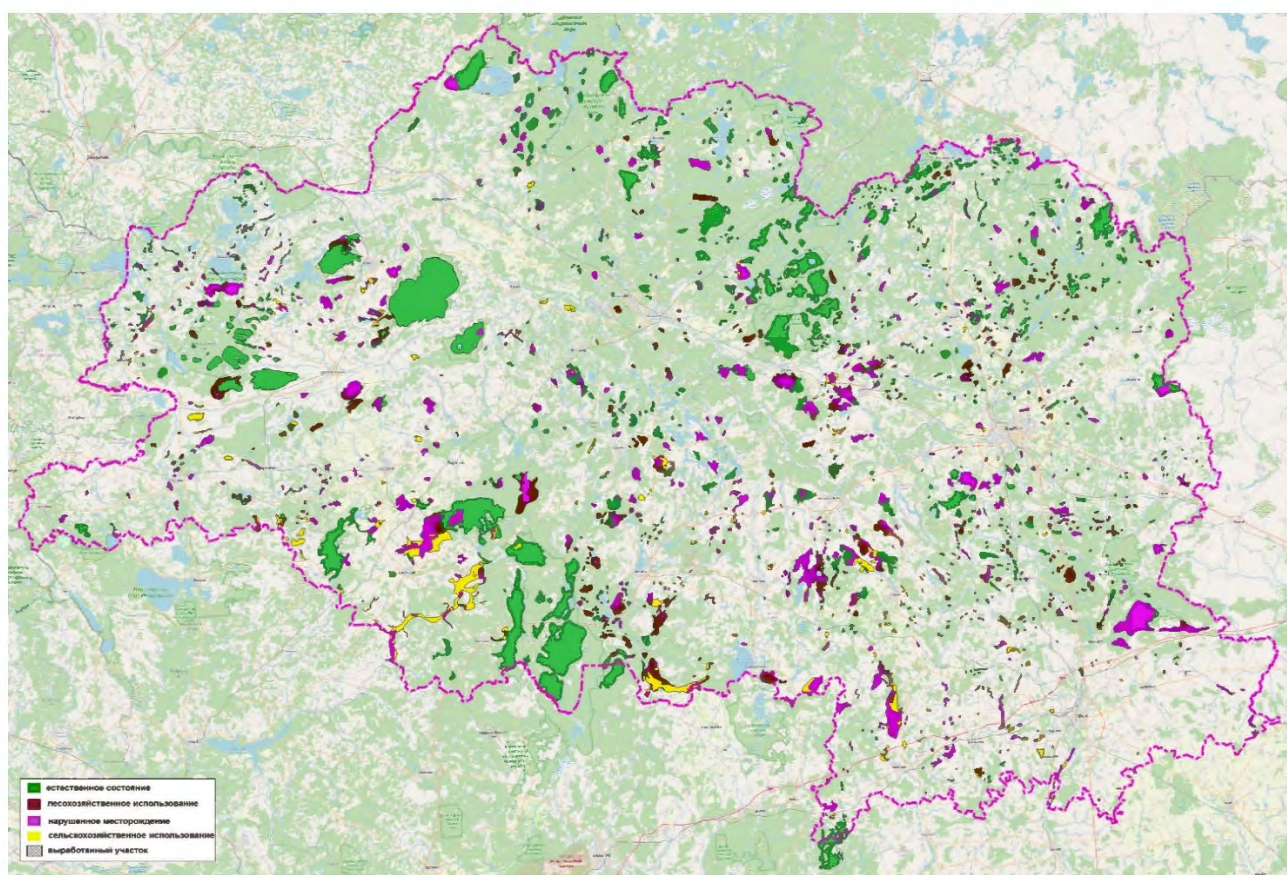
Всего по Витебской, Гродненской и Минской областям Беларуси проанализировано 3111 торфяных месторождений площадью более 10 га, общая площадь которых составляет 1102,3 тыс. га (табл. 1).

Наибольшую площадь торфяные месторождения занимают в Минской области – 575,2 тыс. га, или 14,3 % территории области. Процентное соотношение площади торфяных месторождений Витебской области (362,0 тыс. га) к площади области составляет 9,0 %. Гродненская область характеризуется наименьшим количеством торфяных месторождений – 393, при относительно небольшой величине их общей площади – 165,8 тыс. га, что составляет 6,6 % территории области.

На рис. 1–3 представлены карты торфяных месторождений Витебской, Гродненской и Минской областей.

Таблица 1. Распределение площадей торфяных месторождений по Витебской, Гродненской и Минской областям**Table 1. Distribution of areas of peat deposits in the Vitebsk, Grodno and Minsk regions**

Область	Площадь области, тыс. га	Площадь торфяных месторождений, тыс. га	Процентное соотношение площади торфяных месторождений к площади области, %	Участки торфяных месторождений, выбывшие из промышленной эксплуатации, тыс. га	Процентное соотношение площадей торфяных месторождений, выбывших из эксплуатации, %	Количество торфяных месторождений
Витебская	4000	362,0	9,0	45,8	12,7	1521
Гродненская	2510	165,1	6,6	28,4	17,2	393
Минская	4020	575,2	14,3	87,1	15,1	1197
<i>Всего</i>	<i>10 530</i>	<i>1102,3</i>	<i>—</i>	<i>163,0</i>	<i>—</i>	<i>3111</i>

**Рис. 1. Карта торфяных месторождений Витебской области****Fig. 1. Map of peat deposits of the Vitebsk region**

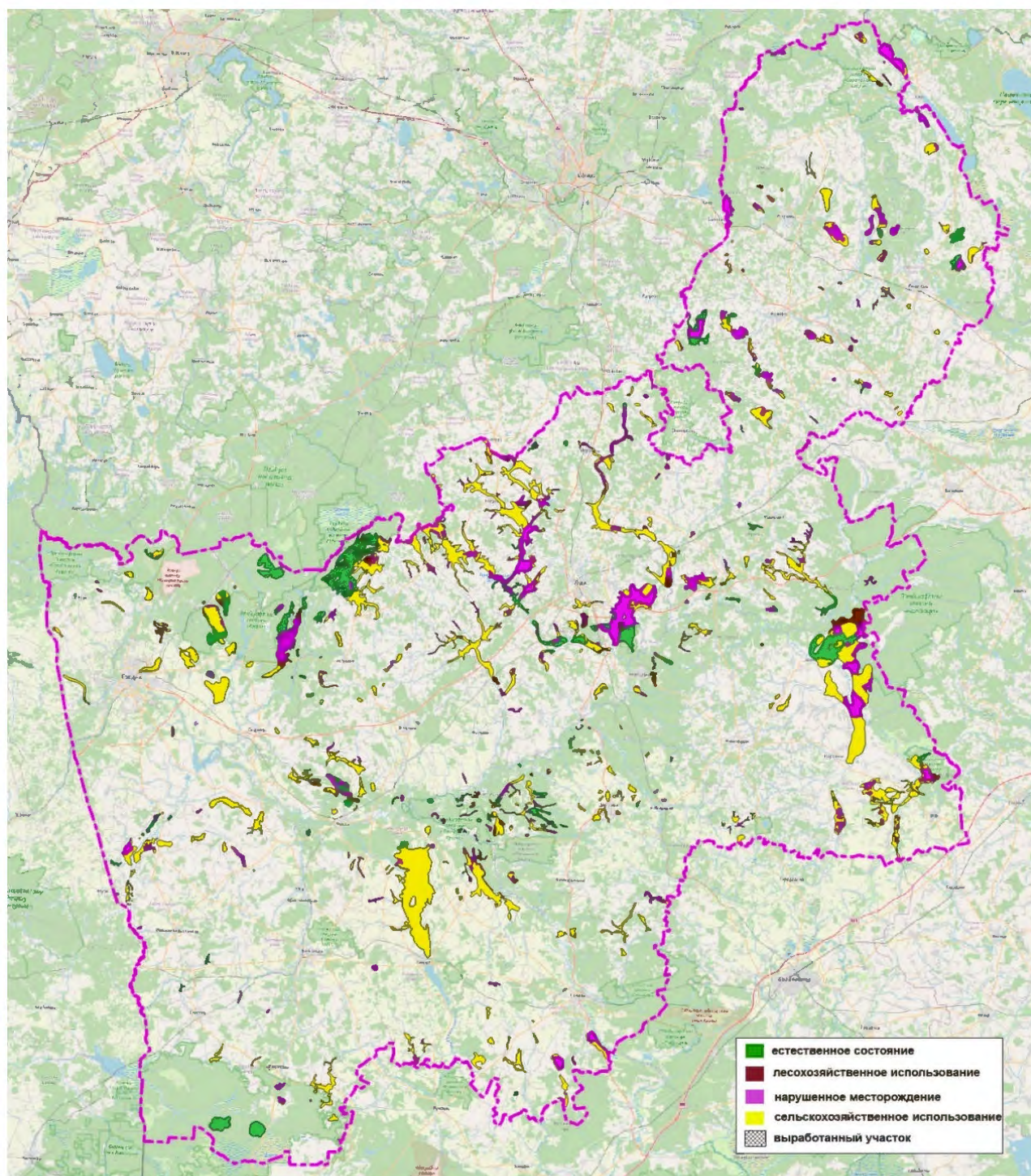


Рис. 2. Карта торфяных месторождений Гродненской области

Fig. 2. Map of peat deposits of the Grodno region

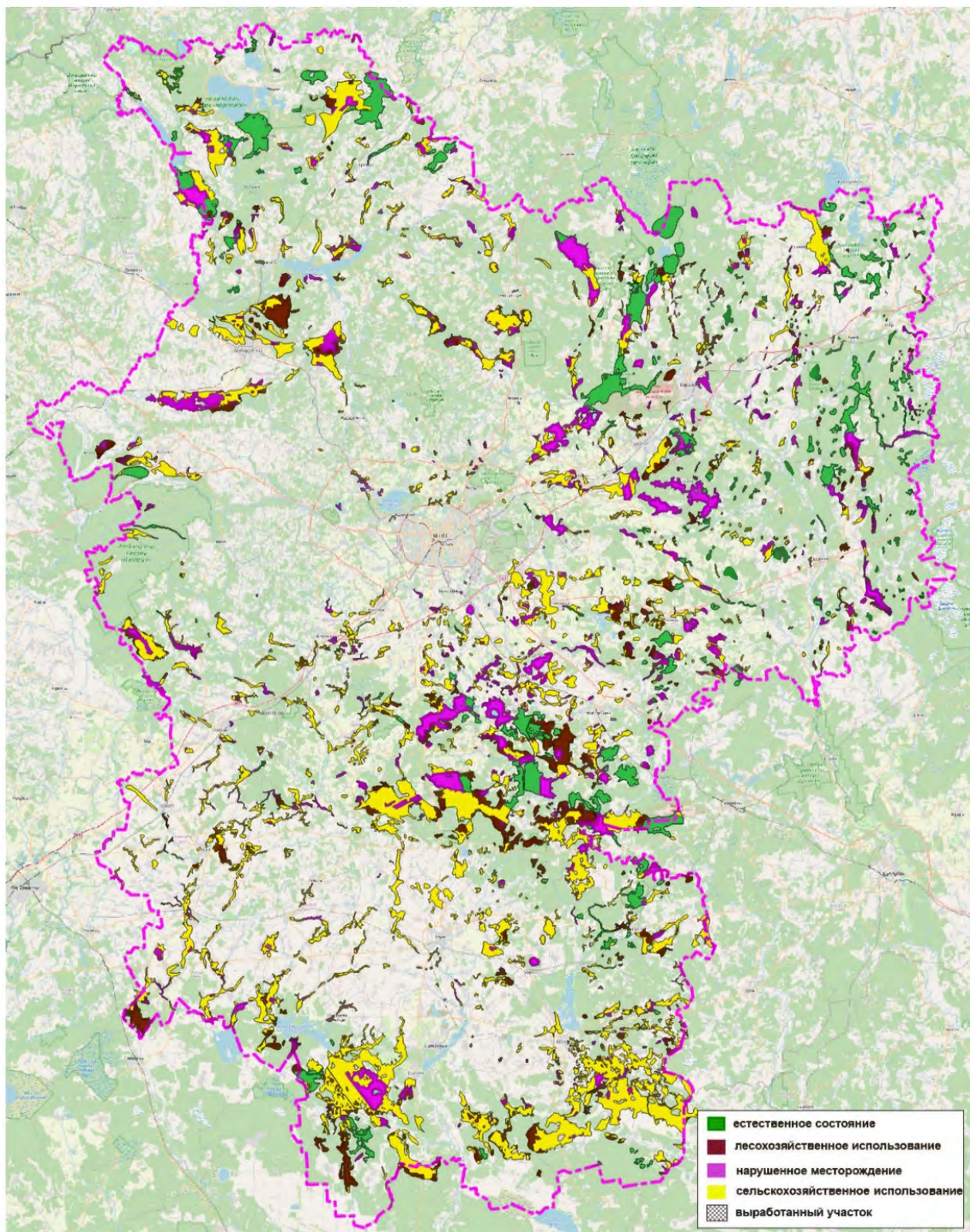


Рис. 3. Карта торфяных месторождений Минской области

Fig. 3. Map of peat deposits of the Minsk region

Результаты анализа состояния территорий торфяных месторождений представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Общая площадь естественных болот трех областей республики, составляет 326,6 тыс. га, нарушенных болот – 243,3 тыс., торфяных месторождений, покрытых лесной растительностью – 130,4 тыс., осушенных земель с торфяными почвами сельскохозяйственного использования – 402,8 тыс. га (табл. 2).

Анализ диаграмм распределения торфяных месторождений по категориям современного состояния (рис. 4) показал, что наибольшую площадь занимают естественные болота в Витебской области – 199,1 тыс. га, или 55 % территории месторождений. Следующими по величине занимаемой площади являются нарушенные болота – 87,5 тыс. га (24 %), торфяные месторождения, покрытые лесной растительностью (используемые в лесном хозяйстве) и осушенные земли с торфяными почвами, используемые в сельском хозяйстве, занимают 12 и 9 % территорий месторождений соответственно.

Таблица 2. Распределение площадей торфяных месторождений по категориям современного состояния

Table 2. Distribution of areas of peat deposits by categories of current state

Область	Естественное торфяное болото, тыс. га	Торфяное месторождение, покрытое лесной растительностью, тыс. га	Нарушенное торфяное болото, тыс. га	Осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования, тыс. га	Всего, тыс. га
Витебская	199,1	44,9	87,5	30,4	362,0
Гродненская	27,4	6,2	41,9	89,6	165,1
Минская	100,1	79,3	113,9	282,0	575,2
<i>Всего</i>	326,6	130,4	243,3	402,0	1102,3

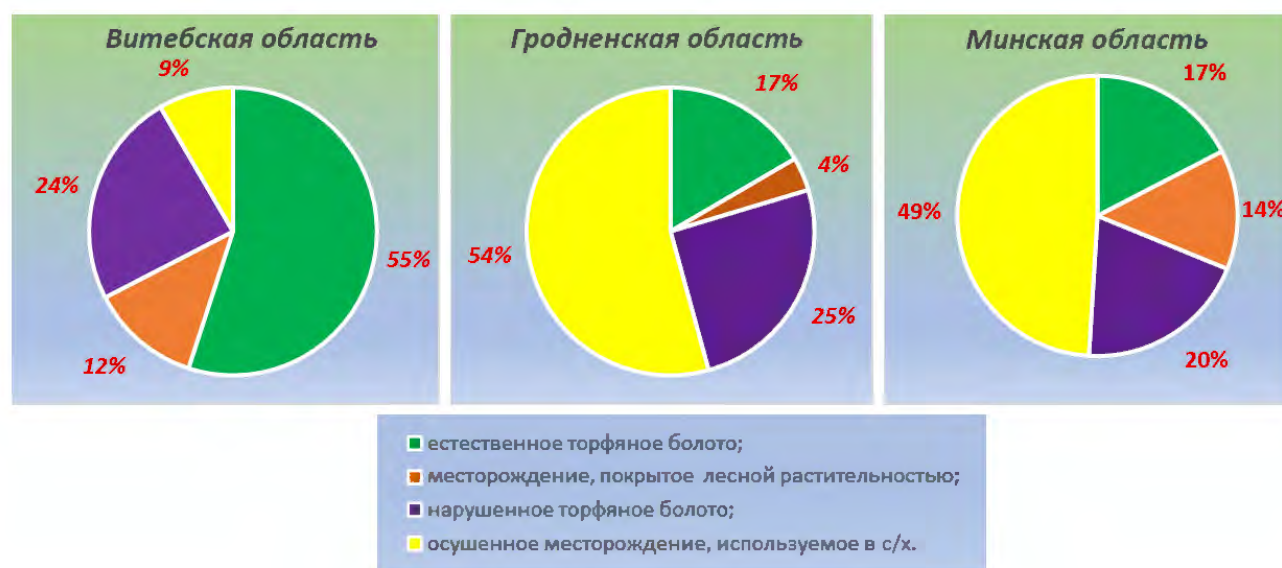


Рис. 4. Диаграмма распределения площадей торфяных месторождений по категориям

Fig. 4. Diagram of the distribution of peatland areas by category

В отличие от Витебской области, территории торфяных месторождений Гродненской и Минской областей наиболее широко представлены осушенными землями с торфяными почвами сельскохозяйственного назначения – 54 и 49 % соответственно. Доля естественных болот в Гродненской и Минской областях составляет 17 %. По площади эти категории в областях существенно различаются и составляют 27,4 тыс. га для Гродненской области и 100,1 тыс. га в Минской. Нарушенных площадей (и неиспользуемых) меньше всего в Гродненской области – 6,2 тыс. га, больше всего нарушенных площадей торфяных месторождений находится в Минской области – 113,9 тыс. га.

Уточнение границ осушенных и интенсивно используемых в сельском хозяйстве торфяных месторождений, а также участков, выбывших из эксплуатации после добычи торфа, позволило оценить оставшиеся запасы торфа. Учитывалось уменьшение запасов торфа, имеющее место в результате промышленной добычи и потери органического вещества из-за минерализации торфа вследствие осушения и сельскохозяйственного использования торфяных месторождений. При расчете оставшихся геологических запасов из значений запасов, рассчитанных на год разведки, вычитались запасы, содержащиеся на выбывших из эксплуатации участках месторождений (часть геологических запасов на год разведки, пропорциональную выработанной части площади в границах промышленной глубины залежи) и потери торфа в результате минерализации органического вещества на площадях категории «Осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования» (9,6 т/га в год, период – 50 лет). Главным достоинством методики является ее объективность: по снимкам регистрируется реально выработанная часть месторождения, запасы с которой и вычитаются из первоначальных, а также реально используемая в сельскохозяйственном производстве площадь. Недостатками ее является возможная завышенность вычитаемых запасов в случае выработки части месторождения на глубину меньше средней.

Выполненные расчеты показали, что запасы торфяной залежи некоторых торфяных месторождений, в основном используемых в сельском хозяйстве, исчерпаны. Выявлено, что на некоторых месторождениях уже фактически отсутствуют запасы торфа и их можно с полным основанием перевести в категорию деградированных земель.

В табл. 3 представлены данные по расчету оставшихся запасов торфа.

Таблица 3. Распределение оставшихся запасов торфа условной 40%-ной влажности торфяных месторождений по трем областям

Table 3. Distribution of the remaining peat reserves of the 40 percent conditional moisture content of peat deposits in three regions

Область	Геологические запасы торфа, млн т		Потери торфа в результате минерализации органического вещества, млн т	Оставшиеся запасы торфа**, млн т
	на момент разведки*	на участках, выбывших из эксплуатации		
Витебская	1186,2	204,1	6,9	975,2
Гродненская	403,8	122,6	25,7	255,5
Минская	1490,2	366,1	105,8	1018,3
<i>Всего</i>	<i>3080,2</i>	<i>692,8</i>	<i>138,4</i>	<i>2249,0</i>

*Расчет геологических запасов выполнен по данным кадастрового справочника «Торфяной фонд Белорусской ССР» (1979 г.) с учетом дополнений и уточнений, приведенных в «Схеме рационального использования и охраны торфяных ресурсов Республики Беларусь на период до 2010 года» (1989 г.).

**В расчете оставшихся запасов не учтены потери от ветровой и водной эрозии осушенных торфяных месторождений, потери от пожаров вследствие отсутствия исходных данных.

Согласно расчетам, оставшиеся запасы торфяных месторождений всех категорий, в том числе естественных и нарушенных болот, составляют в Витебской области – 975,2 млн т, в Гродненской области – 255,5 млн, в Минской области – 1018,3 млн т.

В табл. 4 приведены данные по оценке количества месторождений с оставшимися геологическими запасами менее 10 тыс. т и менее 40 тыс. т.

Таблица 4. Количество месторождений по трем областям с нулевыми геологическими запасами торфа и запасами менее 10 тыс. т и менее 40 тыс. т торфа условной влажности

Table 4. Distribution of areas of peat deposits with depleted reserves, reserves of less than 10 thousand tons and less than 40 thousand tons of peat of conditional humidity in three regions

Область	Количество месторождений			
	всего	оставшиеся геологические запасы (расчетные), тыс. т		
		0	0–10	10–40
Витебская	1521	64	123	322
Гродненская	393	10	54	71
Минская	1197	55	155	201
<i>Всего</i>	<i>3111</i>	<i>129</i>	<i>332</i>	<i>594</i>

На рис. 5–7 представлены актуальные распределения торфяных месторождений по оставшимся запасам.

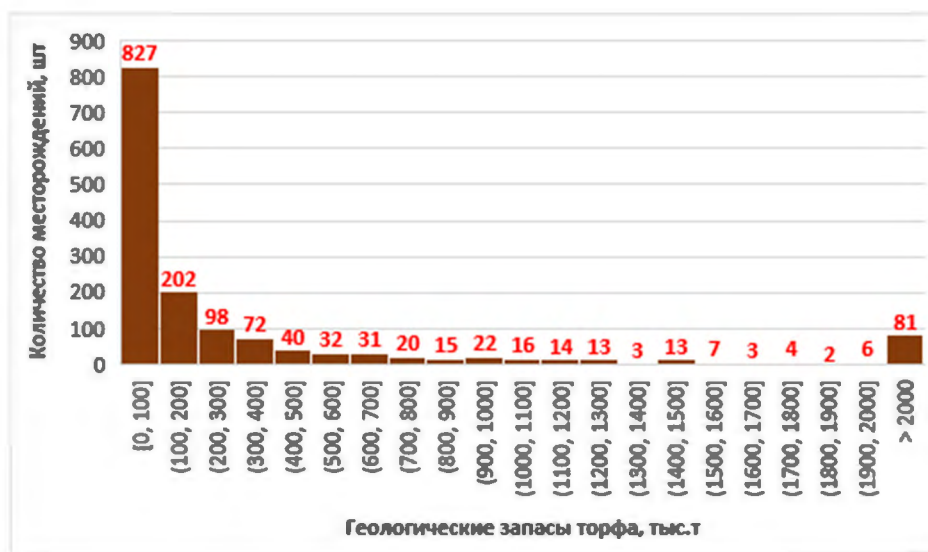


Рис. 5. Статистическая диаграмма распределения торфяных месторождений Витебской области по запасам торфа

Fig. 5. Statistical diagram of the distribution of peat deposits of the Vitebsk region by peat reserves

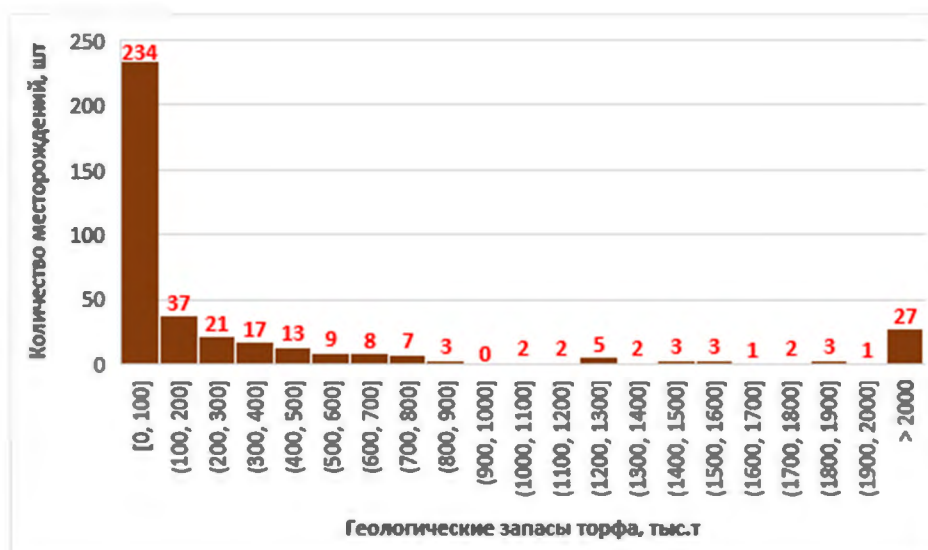


Рис. 6. Статистическая диаграмма распределения торфяных месторождений Гродненской области по запасам торфа

Fig. 6. Statistical diagram of the distribution of peat deposits of the Grodno region by peat reserves



Рис. 7. Статистическая диаграмма распределения торфяных месторождений Минской области по запасам торфа

Fig. 7. Statistical diagram of the distribution of peat deposits of the Minsk region by peat reserves

Анализ приведенных данных показывает, что во всех исследуемых областях в основном преобладают торфяные месторождения с запасами до 100 тыс. т. (54,4; 59,4 и 51,2 % для Витебской, Гродненской и Минской областей соответственно). В процентном отношении торфяных месторождений с запасами более 2000 тыс. т больше всего в Минской области – 8,1 %, в Гродненской области – 6,9 %, а меньше всего в Витебской области – 5,3 %.

На рис. 8 представлена диаграмма распределения геологических запасов торфа по залежам разной глубины.

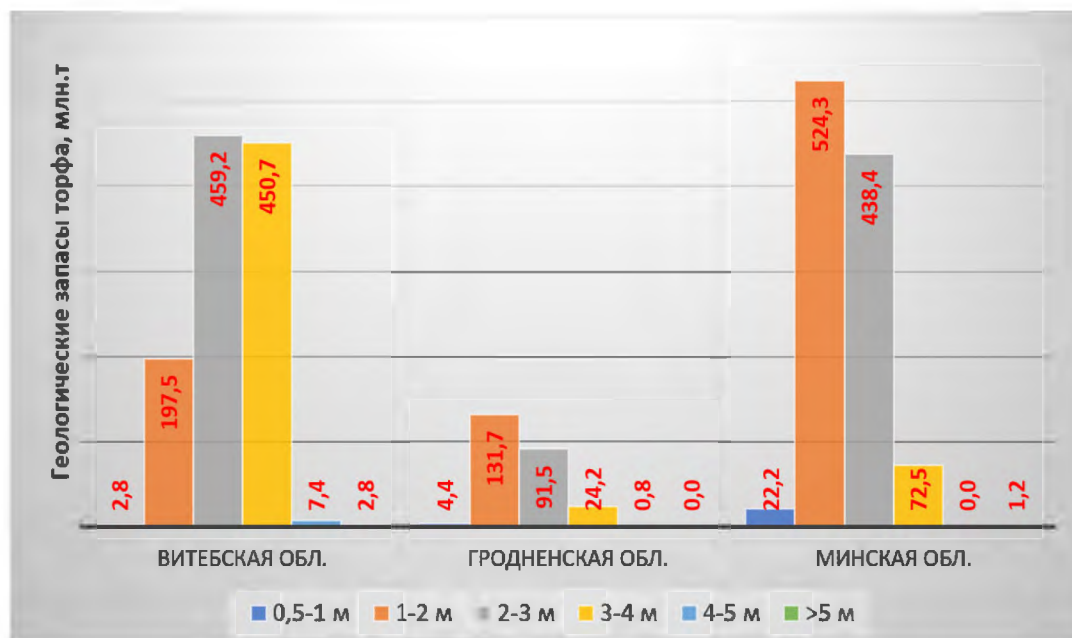


Рис. 8. Распределение геологических запасов торфа по залежам разной глубины

Fig. 8. Distribution of peat reserves by the depth of the peat deposit

Как следует из представленных данных, основные запасы торфа в Гродненской и Минской областях содержатся в торфяных месторождениях с глубиной залежи 1–3 м с максимумом на глубинах 1–2 м. В Витебской области основные запасы торфа находятся в месторождениях с мощностью залежи 2–4 м.

Анализ спутниковых снимков территорий торфяных месторождений позволил оценить эффективность использования выработанных участков (выбывших из эксплуатации).

На рис. 9 приведены данные о состоянии выбывших из эксплуатации участков торфяных месторождений по Витебской, Гродненской и Минской областям.



Рис. 9. Состояние выбывших из эксплуатации участков торфяных месторождений Витебской, Гродненской и Минской областей, тыс. га; %

Fig. 9. Condition of decommissioned areas of peat deposits of Vitebsk, Grodno and Minsk regions, th. tons; %

Как следует из приведенных данных, во всех трех областях выбывшие из эксплуатации участки в основном остаются в нарушенном (и неиспользуемом) состоянии. В Витебской области в нарушенном состоянии остается 91 % площадей. В Гродненской и Минской областях такие участки составляют 70 и 66 % площадей соответственно. Около 30 % площадей выбывших из эксплуатации участков этих областей используются в сельском хозяйстве.

Выбывшие из эксплуатации торфяные месторождения, покрытые лесной растительностью, занимают в Витебской области 2,2 тыс. га (5 %), в Гродненской области – 0,3 тыс. га (1 %), в Минской области – 3,9 тыс. га (4 %).

Основными проблемами выбывших из эксплуатации и других нарушенных торфяных месторождений, неэффективно используемых в сельском и лесном хозяйствах, являются следующие: подтопление территории из-за низкого положения в рельефе или подстилание остаточного слоя торфа водоупорными грунтами (сапрпель, суглинок, глина); неблагоприятный водно-воздушный режим для произрастания сельскохозяйственных культур и условий для работы техники; увеличение расходных составляющих водного баланса осушенного торфяного месторождения за счет интенсивного стока грунтовых вод по осушительной сети; изменение зоны и режима аэрации торфяного слоя в торфяной залежи; прекращение процесса накопления торфа и уплотнение торфяной залежи; пожароопасная обстановка.

Согласно Стратегии сохранения и рационального (устойчивого) использования торфяников в Беларуси из 281,5 тыс. га выбывших из эксплуатации торфяных месторождений 143,4 тыс. га подлежат экологической реабилитации, более 83,8 тыс. га частично или полностью обводнены и находятся в процессе восстановления [1, 2]. И только 54,3 тыс. га можно признать как эффективно используемые для сельского и лесного хозяйства.

Заключение. Всего по Витебской области проанализировано 1521 разведанное торфяное месторождение с площадью более 10 га, в Гродненской области – 393 и в Минской области – 1197, площадь которых составляет 362,0; 165,1 и 575,2 тыс. га соответственно. По используемой при расчетах методике оставшиеся геологические запасы торфа составляют в Витебской области – 975,2 млн т, в Гродненской области – 255,5 млн, в Минской области – 1018,3 млн т.

Анализ спутниковых снимков территорий торфяных месторождений Витебской, Гродненской и Минской областей показал, что в ненарушенном состоянии (естественные болота) в Витебской области находится 55 % площадей торфяных месторождений, в Гродненской и Минской областях – по 17 %. Основная часть территорий месторождений в Гродненской и Минской областях (54 и 49 % соответственно) – это осушенные земли с торфяными почвами сельскохозяйственного использования.

Во всех трех областях находится 129 месторождений с истощенными запасами торфа (запасы равны 0) и 926 месторождений (30 % от общего числа) с геологическими запасами менее 40 тыс. т (запасы, не представляющие интереса для комплексной переработки торфа).

Основные запасы торфа в Гродненской и Минской областях содержатся в торфяных месторождениях с глубиной залежи 1–3 м с максимумом на глубинах 1–2 м. В Витебской области основные запасы торфа находятся в месторождениях с мощностью залежи 2–4 м.

Из выбывших из эксплуатации площадей торфяных месторождений эффективно используются в сельском хозяйстве, т. е. относятся к категории осушенных земель с торфяными почвами: в Витебской области – 2,1 тыс. га (4 %), в Гродненской области – 8,3 тыс. га (29 %), в Минской области – 25,7 тыс. га (30 %); площади, не используемые эффективно (с кустарниковой растительностью): в Витебской области – 41,7 тыс. га (91 %), в Гродненской области – 19,8 тыс. га (70 %), в Минской области – 57,7 тыс. га (66 %).

Список использованных источников

1. Стратегия сохранения и рационального (устойчивого) использования торфяников [Электронный ресурс] : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 30 дек. 2015 г. № 1111. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21501111>. – Дата доступа: 10.05.2023.
2. Схема распределения торфяников по направлениям использования на период до 2030 года [Электронный ресурс] : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 30 дек. 2015 г. № 1111. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21501111>. – Дата доступа: 10.05.2023.

References

1. *Strategija sohranjenja i ratsional'nogo (ustojchivogo) ispol'zovanija torfjanikov* [Strategy for the conservation and rational (sustainable) use of peatlands]. *Utverzhdena postanovleniem Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 30 dekabrja 2015 g.* [Approved by resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, 30 December 2015]. No. 1111 Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21501111> (accessed 10 May 2023) (in Russian)
2. *Shema raspredelenija torfjanikov po napravlenijam ispol'zovanija na period do 2030 g.* [The scheme of distribution of peatlands in the directions of use for the period up to 2030]. *Utverzhdena postanovleniem Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 30.12.2015 g.* [Approved by the resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, 30 December 2015]. No. 1111. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21501111> (accessed 10 May 2023) (in Russian)

Информация об авторах

Навоша Юльян Юльянович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: navoscha@tut.by

Ратникова Ольга Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: 306peatlands@mail.ru

Агейчик Инна Валерьевна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Ageichik.iv@mail.ru

Information about the authors

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: navoscha@tut.by

Olga N. Ratnikova – Ph. D. (Technical), Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (F. Skoriny Str., 10, 220076, Minsk, Belarus). E-mail: 306peatlands@mail.ru

Inna V. Ageichik – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Ageichik.iv@mail.ru

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-141-149>
УДК 619.614.31:637.5'64

Поступила в редакцию 07.11.2023
Received 07.11.2023

ОЦЕНКА БАКТЕРИОСТАТИЧЕСКИХ И ТОКСИКОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТОРФА

А. Э. Томсон¹, Ю. Г. Янута¹, Т. Н. Каменская², С. А. Лукьянчик²,
Т. В. Соколова¹, Т. Я. Царюк¹, Ю. Ю. Навоша¹, Г. Г. Янута¹, А. С. Марзан¹

¹Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь;

²РУП «Институт экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышелесского», Минск, Беларусь

Аннотация. В работе приведены материалы по оценке антимикробных свойств сорбентов различной рецептуры на основе торфа. Показана эффективность их бактериостатических свойств. Полученные результаты свидетельствуют о пролонгированном бактериостатическом действии сорбентов. Проведены исследования по оценке их безвредности и биологической ценности для животных. Показана низкая эффективность древесных опилок в глубоководную подстилку в птицеводстве. Полученные результаты подтверждают вывод о высокой энтеросорбционной активности торфяных и органоминеральных материалов на основе торфа, оказывающих положительное влияние на протекание физиологических процессов развития птицы за счет сорбции и выведения микотоксинов и тяжелых металлов.

Ключевые слова: сорбенты на основе торфа; метод диффузии в агар; антимикробная активность; бактериостатические свойства; токсичность; безвредность.

Для цитирования. Томсон А. Э., Янута Ю. Г., Каменская Т. Н., Лукьянчик С. А., Соколова Т. В., Царюк Т. Я., Навоша Ю. Ю., Янута Г. Г., Марзан А. С. Оценка бактериостатических и токсикологических свойств сорбционных материалов на основе торфа // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 141–149.

ASSESSMENT OF THE BACTERIOSTATIC AND TOXICOLOGICAL PROPERTIES OF SORPTION MATERIALS BASED ON PEAT

A. E. Thomson¹, Yu. G. Yanuta¹, T. N. Kamenskaya², S. A. Lukyanchik²,
T. V. Sokolova¹, T. Ya. Tsaryuk¹, Yu. Yu. Navosha¹, G. G. Yanuta¹, A. S. Marzan¹

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

²RUE "S. N. Vyshelesskogo Institute of Experimental Veterinary Medicine", Minsk, Belarus

Abstract. The work provides materials on the assessing of the antimicrobial properties of the sorbents of various formulations based on peat. The effectiveness of their bacteriostatic properties has been shown. The obtained results indicate prolonged bacteriostatic effect of the sorbents. The studies have been conducted to assess their harmlessness, toxicity and biological value for animals. Low efficiency of sawdust in deep litter in poultry farming has been shown. The obtained results confirm the conclusion about high enterosorption activity of peat and organomineral materials based on peat having positive effect on the physiological processes of poultry development due to the sorption and removal of mycotoxins and heavy metals.

Keywords: peat-based sorbents; agar diffusion method; antimicrobial activity; bacteriostatic properties; toxicity; harmlessness.

For citation. Thomson A. E., Yanuta Yu. G., Kamenskaya T. N., Lukyanchik S. A., Sokolova T. V., Tsaryuk T. Ya., Navosha Yu. Yu., Yanuta G. G., Marzan A. S. Assessment of the bacteriostatic and toxicological properties of sorption materials based on peat. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 141–149.

Введение. Препараты на основе торфа плотно вошли в различные сферы жизни: от использования в качестве топлива до продуктов с высокой добавленной стоимостью – гуминовых препаратов, стимуляторов роста растений и др. Одним из перспективных направлений переработки торфа является производство сорбционных материалов. Оно открывает широкие перспективы для применения этой группы веществ в разнообразных областях хозяйственной деятельности: от очистки воздуха до использования в фармацевтической промышленности. Новое направление применения данных веществ –

использование в качестве компонента для сорбции продуктов жизнедеятельности в животноводческих комплексах, специализирующихся на ведении интенсивного откорма животных и птицы. Такие сорбенты обладают рядом уникальных свойств: высокой поглотительной емкостью, что позволяет сохранить оптимальные показатели микроклимата в рабочих зонах предприятий; пролонгированным действием, которое составляет 45–50 дней; биодеструкцией после окончания срока эксплуатации без дополнительных мероприятий по утилизации. Многолетние испытания таких материалов показали свою эффективность по сравнению с наиболее часто применяемыми для этих целей материалами (древесными опилками) [1].

В современном промышленном птицеводстве (как отечественном, так и зарубежном) используются клеточные и напольные способы содержания и выращивания птицы. При напольном выращивании бройлеров к качеству подстилочного материала предъявляются повышенные требования. Основными его критериями являются оптимальная влагопоглощающая способность, сухость, рыхлость, низкая теплопроводность при использовании в птичниках с неотапливаемыми полами, отсутствие бактерий и микроскопических грибов [1]. Весьма важными требованиями, которые предъявляются к подстилочным материалам, являются способность обеспечивать удаление и связывание из воздушной среды токсичных загрязняющих веществ, подавлять развитие болезнетворной микрофлоры, а также отсутствие дополнительного запыления.

Основными источниками загрязнений, поступающих от животноводческих ферм и птицефабрик в окружающую среду, являются вентиляционные выбросы, навоз и стоки в процессе их удаления, хранения и утилизации. Как следует из работы [2], максимальную удельную массу в структуре аэровыброса составляет аммиак – до 80 %; на долю пылевидных частиц, меркаптанов и сероводорода приходится 17,3; 1,2 и 0,3 % соответственно. Авторы статьи отмечают, что при разработке природоохранных мероприятий приоритетными должны быть те, которые способны сократить выброс соединений с наибольшей удельной массой, например аммиака.

Поскольку подстилка является одной из составляющих всей комплексной системы содержания птицы, существенные недостатки в других элементах (системы поения и кормления, температурно-влажностный режим в помещениях, продолжительность и последовательность технологических циклов и т. д.) могут привести к значительному снижению эффективности использования даже правильно подобранных материалов. По мнению специалистов из Института защиты животных и животноводства (Institut für Tierschutz und Tierhaltung) в г. Целле, не существует суперподстилки, применение которой позволит устранить все производственные проблемы. Принципиально важно, чтобы подстилочные материалы не оказывали вредного воздействия на здоровье птицы, а при их применении продуктивность поголовья и качество мясного сырья не снижались. От свойств подстилки напрямую зависят частота возникновения и тяжесть протекания такого заболевания, как плантарный пододрематит, или дерматит подушечек лап [3]. Главная причина появления дерматита подушечек лап – чрезмерная влажность подстилки (этот параметр обусловлен составом самой подстилки и состоянием окружающей среды). Оптимальная влажность подстилки – 30 %. Превышение этого порогового значения ведет к развитию дерматита подушечек лап. Если подстилка сухая, в помещении снижается концентрация аммиака, что положительно сказывается на здоровье поголовья. Вот почему важно учитывать такие особенности подстилки, как ее способность к набуханию, а также способность связывать и отдавать влагу (из помещения лишнюю влагу быстро удаляют при помощи вентиляции). Установлено, что физические показатели птицы практически не изменялись в зависимости от того, какой подстилочный материал применяли на предприятии, а вот частота поражения подушечек лап и тяжесть протекания болезни существенно различались. Наибольшее количество патологий зафиксировано при использовании сосновых опилок, измельченной соломы, отходов хлопкового производства и сосновой щепы.

Известно применение торфа как добавки к подстилочному материалу любого вида. Он может необратимо поглощать аммиак за счет протекания хемосорбционных процессов (до 2,5 % своей массы), поскольку опасность для птицы представляет также эмиссия из подстилки вредных газов (аммиака, углекислоты, сероводорода), которые существенно снижают продуктивные показатели птицы. Торф может также адсорбировать воду в 15–20 раз больше собственной массы. Преимущества торфа как адсорбента аммиака заключаются в том, что он безопасен в применении и не наносит вред окружающей среде. Кроме того, торф имеет высокие антисептические свойства, а отработанная подстилка после использования – это ценное органическое удобрение [4]. В случае склеивания торфа птицей (что нередко случается) он не причиняет вреда ее организму. Наоборот, его довольно богатый минеральный состав положительно влияет на минеральный обмен организма птицы и выполняет определенные функции в сорбции микотоксинов и микроорганизмов.

Таким образом, использование торфа как компонента глубокой подстилки при напольном содержании птицы должно быть направлено на регулирование гидрофильных и сорбционных свойств торфяного компонента, повышение механической прочности, так как при наличии 60 % частиц размером

менее 3 мм в птичнике появляется много пыли, а также на возможность нейтрализовать болезнетворные микроорганизмы в глубокой подстилке.

Одним из способов, направленных на снижение негативного влияния избыточной влаги и токсичных компонентов газовой среды в птичнике, избыточной запыленности, подавления развития болезнетворной микрофлоры, служат добавки различной функциональной природы, которые способны оказывать влияние не только на нормализацию среды обитания птицы, но в то же время и на то, чтобы используемые подстилочные материалы не вредят здоровью птицы, а при их применении продуктивность поголовья и качество мясного сырья не снижались.

Обычно в качестве подстилки используют древесные опилки и стружку, но они становятся дефицитом и с каждым годом дорожают. Эти обстоятельства побуждают искать новые источники материалов или частично экономить их за счет добавки некоторых минеральных веществ – цеолитов, лигнитов, вермикулита и некоторых других минералов. Так, в работе [5] приводится подстилка для животных на основе гранулированного верхового торфа, отличающаяся тем, что торф дополнительно содержит глину с получением торфоминеральной композиции при следующем соотношении компонентов, мас. % по сухому веществу: торф – 45–95, глина (каолиновая глина или любой другой глинистый минерал) – 50–10. Торфоминеральная композиция выполнена в виде шарообразных гранул диаметром 6–10 мм, образованных методом окатывания на тарельчатом грануляторе.

Нашими исследованиями показано, что эффективно регулировать свойства торфяной подстилки можно путем введения в торфяную матрицу практически любых минералов, оказывающих влияние на сорбционные и гидрофильные свойства композиционных органоминеральных систем [6]. Так, добавки минералов карбонатной природы способны оказывать влияние на повышение прочности торфяных материалов в процессе гранулирования, что позволяет снизить параметры запыленности воздушной среды в птичниках.

Исследования по оценке бактериостатических свойств, а также безвредности, токсичности и биологической ценности препаратов на основе торфа выполняли на базе лаборатории ветсанитарии и экологии РУП «Институт экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышелесского».

Цель работы – провести оценку бактериостатических свойств сорбционных материалов на основе торфа, а также их токсичности и безвредности.

Материалы и методы исследования. Образцы представляли собой композицию торфяного и минерального субстрата в виде гранулированного вещества, нерастворимого в воде.

Антимикробную активность испытуемых образцов сорбентов в нативном виде проводили методом диффузии в агар. В качестве микроорганизмов использовали тест-культуры *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Proteus vulgaris*, *Candida albicans*. Для измерения мутности суспензии бактерий применяли денситометр DEN-1. Так, количество микробов в 1 мл микробной взвеси соответствовало $1,5 \cdot 10^5$ клеток/мл.

Изучение бактериостатических свойств образцов проводили в два этапа.

На первом этапе изучали антимикробную эффективность сорбентов. Применяли стандартный луночный метод (метод диффузии в агар) с использованием чашек Петри. В качестве среды использовали мясопептонный агар. После застывания агара в лунки помещали изучаемый образец сорбента в одинаковом объеме для каждой чашки. После контакта изучаемого сорбента с агаром (40–60 мин) чашки ставили в термостат на сутки при температуре 37 °С. Опыт повторяли в четырехкратной последовательности. Учет активности исследуемого образца сорбента к тест-культурам вели по диаметру зоны просветления вокруг лунки, а после выводили среднее значение.

На первом этапе изучали зоны задержки роста тест-микроорганизмов вокруг лунки, куда помещали изучаемый торфяной сорбент при использовании метода диффузии в агар. На трех культурах микроорганизмов – *E. coli*, *S. aureus*, *P. vulgaris* – отмечен бактериостатический эффект, зона лизиса составляла от 10,0 до 11,41 мм. В то же время на *C. albicans* бактериостатическое влияние было минимальным.

На втором этапе на инфицированные культурой стафилококка тест-объекты наносили образец торфяного сорбента и выдерживали 30 мин, 1 ч, 3 ч и 6 ч. После этого тест-объекты помещали в термостат на 1 сут и после 24 ч экспозиции высевали на стафилококкагар по общепринятым методикам. В качестве тест-объектов использовали пластинки из стекла, дерева, металла, бетона, резины размером 10 см × 10 см. Микробная нагрузка культуры *Staphylococcus aureus* в 1 мл микробной взвеси составила $4,1 \cdot 10^3$ клеток.

Для оценки токсичности и безвредности использовали общепринятый метод [7]. В качестве тест-организмов взяли инфузорию (*Tetrahymena pyriformis*) и лабораторных животных (белых мышей). При оценке токсичности сформировали четыре группы белых беспородных нелинейных мышей обоего пола по 10 особей в каждой: животным первой группы принудительно внутрижелудочно с использованием шприца и зонда вводили крахмальный клейстер с содержанием 10%-го торфяного сор-

бента (образец № 1), животным второй группы – крахмальный клейстер с содержанием 10%-го торфо-минерального сорбента (образец № 2), животным третьей группы – крахмальный клейстер с содержанием 10%-го торфо-органоминерального сорбента (образец № 3), животным четвертой группы (контроль) – также принудительно вводили чистый клейстер. Введение мышам опытных и контрольной групп соответствующих растворов клейстера проводили 1 раз в день в количестве 0,8 мл в течение 10 дней.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследований по оценке эффективности действия торфяного сорбента на инфицированные культурой *S. aureus* тест-объекты (пластинки из стекла, дерева, металла, бетона, резины) представлены в табл. 1. Контролем служили тест-объекты, обработанные стерильной водопроводной водой. Наибольший эффект от применения сорбента отмечен на стеклянных поверхностях, минимальный – на древесине.

Таблица 1. Эффективность торфяного сорбента при обеззараживании поверхностей, инфицированных культурой *S. aureus*

Table 1. The effectiveness of peat sorbent in disinfection of surfaces infected with *S. aureus* kultur

Экспозиция, мин	Тест-объект				
	стекло	дерево	металл	бетон	резина
30 (0,5 ч)	369,7 ± 5,2 (53,68 %)	443,5 ± 2,5 (44,43 %)	382,4 ± 0,1 (52,09 %)	419,2 ± 0,2 (47,46 %)	378,9 ± 1,2 (52,51 %)
60 (1 ч)	335,8 ± 2,1 (57,92 %)	417,7 ± 4,5 (47,65 %)	369,7 ± 3,2 (53,67 %)	401,2 ± 0,05 (49,72 %)	360,6 ± 0,04 (54,81 %)
180 (3 ч)	218,1 ± 2,2 (72,67 %)	388,6 ± 1,5 (51,3 %)	294,3 ± 0,1 (63,12 %)	391,1 ± 0,03 (50,99 %)	300,0 ± 0,03 (62,41 %)
480 (6 ч)	200,0 ± 2,2 (74,93 %)	290 ± 1,5 (63,66 %)	250 ± 0,03 (68,67 %)	309 ± 0,03 (61,27 %)	240 ± 0,03 (69,93 %)
Контроль 798,0 ± 47,8 КОЕ/0,2 мл					

Примечание. В таблицах 1–3 приведены средние значения КОЕ ± стандартное отклонение (% от контроля).

Из материалов, приведенных в табл. 1, торфяной сорбент через 30 мин воздействия на тест-объекты обеззараживал их на 44,43–53,68 % в зависимости от вида тест-объекта. Через 6 ч экспозиции обеззараживание обсемененных культурой *S. aureus* тест-объектов проходило от 61,27 до 74,93 %.

На основании представленных результатов видно, что сорбент на основе торфа обладает бактериостатической активностью на всех пяти рассматриваемых тест-объектах. Наибольшая бактериостатическая активность отмечена для стеклянных поверхностей, наименьшая – для древесных и бетонных.

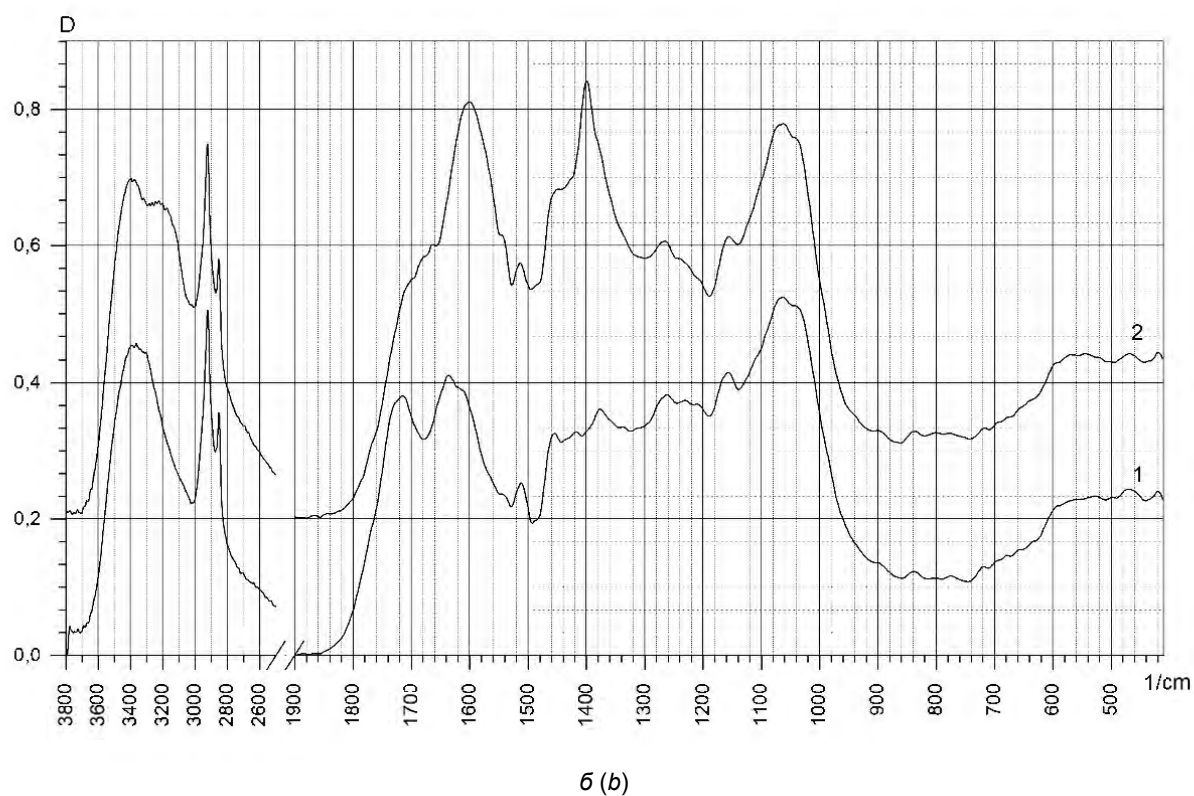
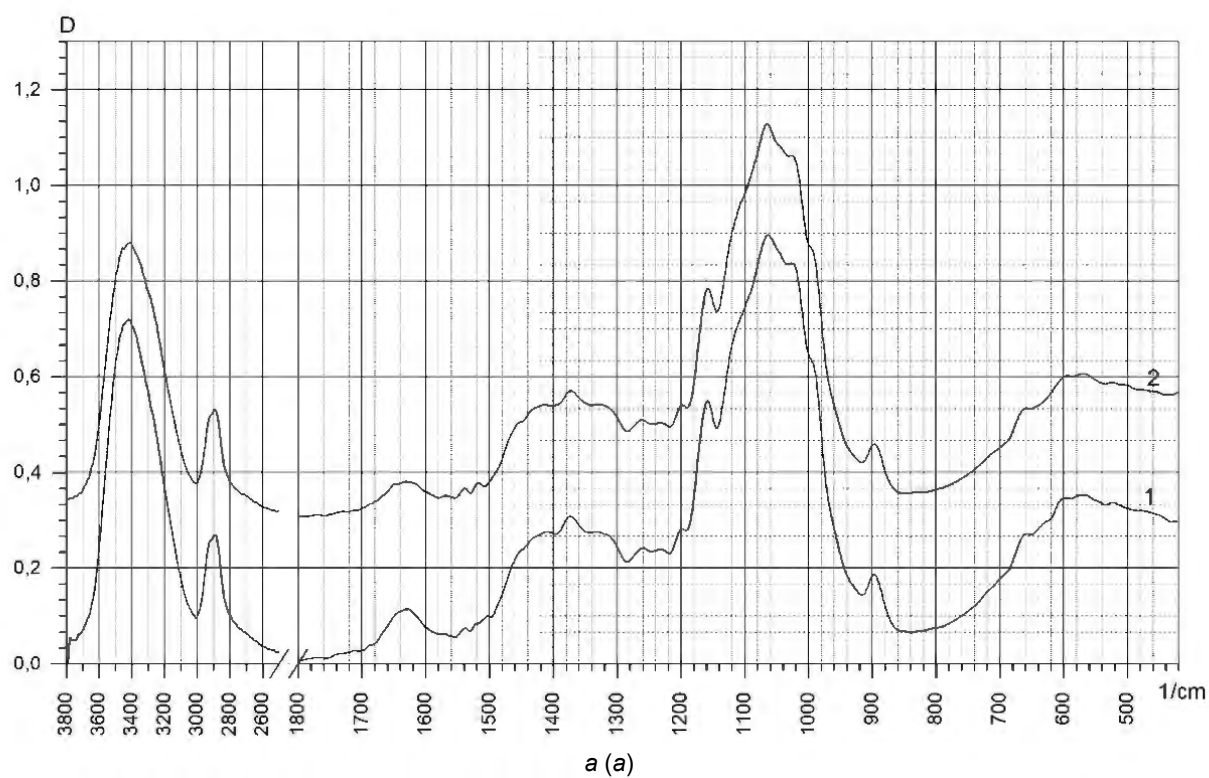
Полученные результаты подтверждают низкую эффективность, наряду с невысокими значениями водопоглощения и рядом других параметров использования в качестве глубокой подстилки древесных материалов (опилки, стружка).

О низкой эффективности использования древесных материалов в качестве глубокой подстилки свидетельствуют полученные нами экспериментальные данные по поглощению газообразного аммиака по данным ИК-спектроскопии.

На рисунке приведены инфракрасные спектры образцов целлюлозы и пушицево-сфагнового торфа до и после обработки газообразным аммиаком.

Из анализа данных ИК-спектров (см. рисунок, а) следует, что обработка образца целлюлозы газообразным аммиаком почти не приводит к каким-либо изменениям в ИК-спектре, т. е. газообразный аммиак практически не взаимодействует с целлюлозой – одним из основным компонентов древесины.

Анализ ИК-спектров образцов пушицевого-сфагнового торфа (см. рисунок, б) показывает, что после обработки торфа газообразным аммиаком в ИК-спектре наблюдаются существенные изменения: уменьшается полоса поглощения свободных карбоксильных групп (1720 см^{-1}), увеличивается интенсивность полос в области поглощения карбоксилат анионов (1600 и 1400 см^{-1} – асимметричные и симметричные валентные колебания C—O группы —CO_2), что обусловлено химическим взаимодействием ионов аммония со свободными карбоксильными группами структурных элементов торфа, при этом существенно увеличивается интенсивность полосы поглощения в области связанных водородом NH -групп (3200 см^{-1}), что указывает на увеличение их содержания.



ИК-спектры образцов целлюлозы (а) и пушицевого-сфагнового (б) торфа:
1 – исходный образец; 2 – после сорбции аммиака

IR-spectra of cellulose (a) and fluffy-sphagnum (b) peat samples:
1 – original sample; 2 – after ammonia sorption

Образец торфоминерального сорбента показал аналогичные результаты испытаний (табл. 2). Через 30 мин воздействия на тест-объекты он обеззараживал их только на 36,03–46,2 %. Через 6 ч экспозиции обеззараживание обсемененных тест-культурой *S. aureus* тест-объектов составило от 47,06 до 68,53 %.

Таблица 2. Эффективность торфоминерального сорбента при обеззараживании поверхностей, инфицированных культурой *S. aureus*

Table 2. The effectiveness of peat-mineral sorbent in the decontamination of surfaces infected with *S. aureus* kultur

Экспозиция, мин	Тест-объект				
	стекло	дерево	металл	бетон	резина
30 (0,5 ч)	371,1 ± 3,2 (45,42 %)	420,5 ± 3,4 (38,24 %)	388,4 ± 6,2 (42,89 %)	435,0 ± 0,2 (36,03 %)	365,9 ± 2,8 (46,20 %)
60 (1 ч)	328,7 ± 4,7 (51,66 %)	419,3 ± 4,8 (38,34 %)	377,1 ± 4,1 (44,55 %)	420,2 ± 2,8 (38,21 %)	359,1 ± 2,8 (47,20 %)
180 (3 ч)	220,6 ± 1,8 (67,56 %)	400,01 ± 5,2 (41,18 %)	354,3 ± 2,5 (47,90 %)	400,6 ± 3,6 (41,09 %)	312,0 ± 2,6 (54,12 %)
480 (6 ч)	214,0 ± 1,2 (68,53 %)	360,01 ± 7,2 (47,06 %)	290 ± 2,2 (57,36 %)	345 ± 7,2 (49,28 %)	280 ± 4,4 (58,83 %)
Контроль 680,0 ± 44,2 КОЕ/0,2 мл					

В сравнении с торфяным сорбентом, у образца торфоминерального сорбента показатели эффективности ниже в среднем на 11,4 %. Максимальные значения эффективности отмечены для стеклянных поверхностей, а минимальные значения – для деревянных.

Использование торфо-органоминерального сорбента показало (табл. 3) более низкие результаты бактериостатического эффекта (в среднем на 7 %) по сравнению с рассматриваемыми выше образцами (см. рисунок).

Таблица 3. Эффективность торфо-органоминерального сорбента при обеззараживании поверхностей, инфицированных культурой *S. aureus*

Table 3. The effectiveness of a peat organomineral sorbent in the disinfection of surfaces infected with *S. aureus* kultur

Экспозиция, мин	Тест-объект				
	стекло	дерево	металл	бетон	резина
30 (0,5 ч)	450,0 ± 4,2 (43,04%)	590,7 ± 2,5 (25,31%)	460,2 ± 5,6 (41,75%)	570,5 ± 2,5 (27,79%)	478,9 ± 7,8 (39,38%)
60 (1 ч)	420,0 ± 7,2 (46,84%)	548,2 ± 3,5 (30,61%)	450,1 ± 3,2 (43,03%)	510,2 ± 5,7 (35,45%)	450,6 ± 1,8 (42,97%)
180 (3 ч)	390,0 ± 4,2 (50,64%)	510,6 ± 7,0 (35,37%)	410,4 ± 6,6 (48,05%)	490,1 ± 3,3 (37,97%)	390,0 ± 3,7 (50,64%)
480 (6 ч)	340,0 ± 3,8 (56,97%)	490,2 ± 1,5 (37,95%)	380,0 ± 7,1 (51,90%)	420,0 ± 6,7 (46,84%)	350,0 ± 2,2 (55,70%)
Контроль 790,0 ± 33,5 КОЕ/0,2 мл					

Как видно из табл. 3, торфо-органоминеральный сорбент через 30 мин воздействия на тест-объекты обеззараживал их только на 25,31–43,04 % в зависимости от вида тест-объекта. Через 6 ч экспозиции обеззараживание обсемененных тест-культурой *S. aureus* тест-объектов проходило на 37,95–56,97 %. Максимальные и минимальные значения отмечены для стекла и дерева соответственно. Средние показатели эффективности также оказались ниже на 17,8% по сравнению с торфяным сорбентом и на 6,3 % ниже по сравнению с торфоминеральным.

Токсиколого-гигиенические исследования показали, что изучаемые образцы (торфяной, торфоминеральный и торфо-органоминеральный сорбенты) были безвредны в течение 24 ч для простейших инфузорий тетрахимена пириформис (табл. 4). При подсчете выросших клеток инфузорий установлено, что во флаконах с торфяным сорбентом количество инфузорий через 24 ч составляло $8,66 \pm 0,33$ клеток, во флаконах с торфоминеральным сорбентом – $10,66 \pm 0,33$, с торфо-органоминеральным сорбентом – $12,33 \pm 0,88$, в контрольной группе – $8,33 \pm 0,33$ клеток.

Таблица 4. Количество выросших инфузорий в течение 24 ч культивирования

Table 4. Number of infusories cultivated during 24 hours

Номер образца	Изучаемый образец	Клеток			% к контролю
		в 1-м флаконе	во 2-м флаконе	в 3-м флаконе	
1	Торфяной сорбент	9	9	8	103,9
	Среднее значение $M \pm m$	8,66 ± 0,33			
2	Торфоминеральный сорбент	11	10	11	128,0
	Среднее значение $M \pm m$	10,66 ± 0,33			
3	Торфо-органоминеральный сорбент	14	12	11	148,0
	Среднее значение $M \pm m$	12,33 ± 0,88			
4	Среда для инфузорий*	9	8	8	100,0
	Среднее значение $M \pm m$	8,33 ± 0,33			

*Культуры инфузорий высевали на среду для тетрахимены пириформис и вводили в нее соответствующий сорбент в количестве 10 %.

Как видно из табл. 4, с включением торфяного сорбента количество инфузорий возросло на 3,9 %, торфоминерального сорбента – на 28,0, торфо-органоминерального сорбента – на 48,0 % по сравнению с контролем.

В опыте на лабораторных животных (белых мышах) установлено, что прирост живой массы одной головы в среднем составил: при введении клейстера с торфяным сорбентом – 6,1 г, или 103,4 %; при введении клейстера с торфоминеральным сорбентом – 6,6 г, или 111,7 %; при введении клейстера с торфо-органоминеральным сорбентом – 6,8 г, или 115,3 %; в контрольной группе – 5,9 г, или 100,0 % соответственно (табл. 5).

Таблица 5. Процентное соотношение среднесуточного прироста у подопытных мышей при использовании сорбентов

Table 5. Percentage of average daily increase in mice using sorbents

Группа	Количество особей, шт.	Вес группы	Вес одной головы	Вес группы	Вес одной головы	Прирост к контролю	
		в начале опыта		в конце опыта		г	%
Образец № 1	10	$204,0 \pm 1,0$	$20,4 \pm 0,1$	$265 \pm 1,0$	$26,5 \pm 0,1$	$6,1 \pm 0,1$	103,4
Образец № 2	10	$210,0 \pm 1,0$	$21,0 \pm 0,1$	$276 \pm 0,9$	$27,6 \pm 0,0$	$6,6 \pm 0,1$	111,7
Образец № 3	10	$208,0 \pm 1,0$	$20,8 \pm 0,1$	$276 \pm 0,9$	$27,6 \pm 0,0$	$6,8 \pm 0,1$	115,3
Образец № 4	10	$199,0 \pm 1,0$	$19,9 \pm 0,1$	$258 \pm 1,0$	$25,8 \pm 0,1$	$5,9 \pm 0,1$	100,0

При клиническом наблюдении подопытных групп животных, которым принудительно вводили в желудок клейстер с соответствующим сорбентом, отклонений в клиническом состоянии мышей обнаружено не было, шерстный покров был гладкий и блестящий, поедаемость корма отмечалась хорошая, нарушений работы желудочно-кишечного тракта и центральной нервной системы не происходило, падежа и заболеваний животных не наблюдалось.

При патологоанатомическом вскрытии животных видимых патологических изменений не установлено, кишечник не вздут, без кровоизлияний, паренхиматозные органы без изменений.

Заключение. Установлено, что все три исследуемых образца на торфяной основе обладают бактериостатическими свойствами. Наиболее интенсивно они проявляются на стеклянных поверхностях. Экспериментально выявлено увеличение бактериостатических свойств сорбентов с увеличением времени экспозиции. Полученные результаты свидетельствуют о пролонгированном бактериостатическом действии данных сорбентов, а также о невысокой эффективности подстилки на основе древесного сырья (опилки), что подтверждается анализом ИК-спектров целлюлозы и пушицево-сфагнового торфа после обработки газообразным аммиаком.

Исследования на токсичность и безвредность сорбентов на основе торфа не только показали их безвредность для животных, но и был отмечен прирост массы в 3,4–15,3 % в зависимости от применяемой рецептуры сорбента. Полученные результаты подтверждают вывод о высокой энтеросорбционной активности торфяных и органоминеральных материалов на основе торфа, оказывающих положительное влияние на протекание физиологических процессов развития птицы за счет сорбции и выведения микотоксинов и тяжелых металлов.

Список использованных источников

1. Чарыев, А. Б. Зоогигиеническая оценка подстилочных материалов для бройлеров / А. Б. Чарыев // Птицеводство. – 2011. – № 3. – С. 59–60.
2. Основные направления природоохранных мероприятий в животноводстве / В. Г. Тюрин [и др.] // Вестник Российского государственного заочного университета. – 2008. – № 5. – С. 132–134.
3. Вербицкий, С. И. Использование подстилки в птичнике / С. И. Вербицкий // Животноводство России. – 2019. – № 11. – С. 21–25.
4. Гигиенические требования к подстилочному материалу, используемому при выращивании птицы: рекомендации / Д. В. Медведева [и др.]. – Витебск : ВГАВМ, 2020. – 24 с.
5. Способ подготовки подстилки из соломы при выращивании цыплят-бройлеров : пат. РФ 2333637 C1 / И. В. Зуев, В. А. Гусев, И. П. Салеева, В. А. Офицеров. – М., 2008.
6. Использование гранулированного торфа в качестве компонента подстилочного материала / В. Н. Фисинин [и др.] // Птица и птицепродукты. – 2013. – № 6. – С. 16–36.
7. Методические рекомендации по ускоренному определению токсичности и безвредности кормов и кормовых добавок / П. А. Красочко [и др.]. – Минск : Ин-т эксперимент. ветеринарии им. С. Н. Вышелесского НАН Беларуси, 2015. – 12 с.

References

1. Charyev A. B. *Zoogigienicheskaya ocenka podstilochnykh materialov dlya brojlerov* [Zoohygienic assessment of bedding materials for broilers]. *Pticevodstvo = Poultry Farming*, 2011, no. 3, pp. 59–60. (in Russian)
2. Tyurin V. G., Mysova G. A., Potemkina N. N. *Osnovnye napravleniya prirodoohrannykh meropriyatij v zhivotnovodstve* [Main directions of environmental protection measures in livestock farming]. *Vestnik Rossijskogo gosudarstvennogo zaochnogo universiteta = Bulletin of the Russian State Correspondence University*, 2008, no. 5, pp. 132–134. (in Russian)
3. Verbickij S. I. *Ispol'zovanie podstilki v ptichnike* [Using litter in the poultry house]. *Zhivotnovodstvo Rossii = Livestock Production of Russia*, 2019, no. 11, pp. 21–25. (in Russian)
4. Medvedeva D. V., Medvedskij V. A., Kosyak A. P., Medvedskaya T. V. *Gigienicheskie trebovaniya k podstilochnomu materialu, ispol'zuemому pri vyrashchivanii pticy* [Hygienic requirements for bedding material used in poultry rearing]. Vitebsk, 2020, 24 p. (in Russian)
5. Zuev I. V. [et al.] *Sposob podgotovki podstilki iz solomy pri vyrashchivanii cyplyat-brojlerov* [Method for preparing straw bedding when raising broiler chickens]. Patent RF, no. 2333637 C1, 2008. (in Russian)
6. Fisinin V. N., Egorov N. A., Tomson A. E., Naumova G. V., Ponomarenko Yu. A., Martynenko A. A. *Ispol'zovanie granulirovannogo torfa v kachestve komponenta podstilochnogo materiala* [Use of granulated peat as a component of bedding material]. *Ptica i pticeprodukty = Poultry and poultry products*, 2013, no. 6, pp. 16–36. (in Russian)
7. Krasochko P. A., Kuchinskij M. P., Tolkach N. G., Kamenskaya T. N. *Metodicheskie rekomendacii po uskorenному opredeleniyu toksichnosti i bezvrednosti kormov i kormovykh dobavok* [Methodological recommendations for the accelerated determination of toxicity and harmlessness of feed and feed additives]. Minsk, S. N. Vyshelessky Institute of Experimental Veterinary Medicine of the National Academy of Sciences of Belarus, 2015, 12 p. (in Russian)

Информация об авторах

Томсон Алексей Эммануилович – кандидат химических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий Центром по торфу и сапропелям, заведующий лабораторией экотехнологий, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: altom@nature-nas.by

Янута Юрий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по науке, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanuta@tut.by

Каменская Татьяна Николаевна – кандидат ветеринарных наук, доцент, заведующая лабораторией ветеринарной санитарии и экологии, Институт экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышелецкого (ул. Брикета, 28, 220003, г. Минск, Беларусь). E-mail: kamenskaya.63@bk.ru

Лукьянчик Станислав Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Институт экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышелецкого (ул. Брикета, 28, 220003, г. Минск, Беларусь). E-mail: kamenskaya.63@bk.ru

Соколова Тамара Владимировна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tomsok49@tut.by

Царюк Татьяна Яковлевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tsariuk9@mail.ru

Навоша Юльян Юльевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: navoscha@tut.by

Янута Григорий Григорьевич – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanuta@tut.by

Марзан Анастасия Сергеевна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: marr_29@mail.ru

Information about the authors

Alexey E. Tomson – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Deputy Director, Head of the Center of Peat and Sapropel, Head of Lab. of Ecotechnology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: altom@nature-nas.by

Yuriy G. Yanuta – Ph. D. (Technical), docent, Deputy Director for Science, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanuta@tut.by

Tatiana N. Kamenskaya – Ph. D. (Veterinary), Associate Professor, Head of the Laboratory of Veterinary Sanitation and Ecology, S. N. Vyshellessky Institute of Experimental Veterinary Medicine (28, Briketa Str., 220003, Minsk, Belarus). E-mail: kamenskaya.63@bk.ru

Stanislav A. Lukyanchik – Ph. D. (Agricultural), Leading Researcher, S. N. Vyshellessky Institute of Experimental Veterinary Medicine (28, Briketa Str., 220003, Minsk, Belarus). E-mail: kamenskaya.63@bk.ru

Tamara V. Sokolova – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tomsok49@tut.by

Tatiana Ya. Tsaryuk – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tsariuk9@mail.ru

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: navoscha@tut.by

Grigoriy G. Yanuta – Ph. D. (Biology), 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: yanuta@tut.by

Anastasiya S. Marzan – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: marr_29@mail.ru

УДК 662.641+547-31/-39

Поступила в редакцию 21.08.2023
Received 21.08.2023**ПОЛИСАХАРИДЫ СФАГНОВЫХ МХОВ И СФАГНОВОГО ТОРФА
МАЛОЙ СТЕПЕНИ РАЗЛОЖЕНИЯ****Н. А. Жмакова, Н. Л. Макарова***Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

Аннотация. Многие полисахариды растительного происхождения обладают биологической активностью и могут рассматриваться как потенциальное сырье для получения препаратов различного назначения для медицины, ветеринарии, растениеводства.

Объектами исследований являлись сфагновые мхи *Sphagnum magellanicum*, *Sphagnum fuscum* и сфагновый магелланикум- и фускум-торф малой степени разложения (10 %). Из этого сырья после делигнификации выделены полисахариды. Выход полисахаридов из холоцеллюлозы фускум-мха составил 5,3 %, из магелланикум-мха – 4,9, из фускум-торфа – 20,6, из магелланикум-торфа – 18,6 % от органической массы. Полисахариды выделены также из исходных образцов мха и торфа по методу Кочеткова – экстракцией смесью щавелевой кислоты и оксалата аммония после удаления водорастворимых соединений. Выход полисахаридов по этому методу значительно ниже и составил для фускум-мха – 1,2 %; для магелланикум-мха – 1,4, для фускум-торфа – 4,2, для магелланикум-торфа – 4,6 % от органической массы. Все полисахариды независимо от исходного сырья и метода выделения имели одинаковый моносахаридный состав. Массовая доля уроновых кислот в образцах полисахаридов, выделенных из холоцеллюлозы мха и торфа, составила 17,3–20,1 %. Для пектинов, выделенных по методу Кочеткова, содержание уроновых кислот было несколько ниже и находилось в пределах 16,8–18,4 %.

Высокое содержание уроновых кислот и сравнительно низкий уровень моносахаридов в кислотных гидролизатах полисахаридов позволяет предположить, что эти соединения относятся к кислым полисахаридам класса пектинов, у которых нейтральные моносахариды, связанные с уроновыми кислотами, с трудом гидролизуются с образованием альдоби- и триуроновых кислот, в связи с чем содержание свободных моносахаридов в гидролизатах невысокое.

Ключевые слова: сфагновый торф; сфагновый мох; полисахариды; пектины; моносахариды; уроновые кислоты.

Для цитирования. Жмакова Н. А., Макарова Н. Л. Полисахариды сфагновых мхов и сфагнового торфа малой степени разложения // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 150–157.

**POLYSACCHARIDES OF SPHAGNUM MOSSES AND SPHAGNUM PEAT
WITH A LOW DEGREE OF DECOMPOSITION****N. A. Zhmakova, N. L. Makarova***Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

Abstract. Sphagnum mosses and little-decomposed sphagnum peat are labile carbohydrate-containing raw materials, most of the organic matter of which is represented by the polysaccharides of various structures. Many polysaccharides of plant origin have biological activity and can be considered to be potential raw material for the obtaining preparations for various purposes for medicine, veterinary medicine and plant growing.

Sphagnum magellanicum, *Sphagnum fuscum* and sphagnum magellanicum and fuscum peat of low degree of decomposition (10 %) sphagnum mosses were objects of research. Polysaccharides are isolated from these raw materials after delignification. The yield of polysaccharides from the holocellulose of fuscum moss was 5.3 %, for magellanicum moss – 4.9, for fuscum peat – 20.6, for magellanicum peat 18.6 % of the organic mass. Polysaccharides were also isolated from the original moss and peat samples by Kochetkov method – by extraction with the mixture of oxalic acid and ammonium oxalate after water-soluble compounds removal. The yield of polysaccharides by this method is much lower and was 1.2 % for fuscum moss; 1.4 % for magellanicum moss, 4.2 % for fuscum peat, and 4.6 % for magellanicum peat per organic mass. All polysaccharides had the same monosaccharide composition regardless of the initial raw material and isolation method. The mass fraction of uronic acids in the polysaccharide samples isolated from moss and peat holocellulose was 17.3–20.1 %. The content of uronic acids was somewhat lower and was in the range of 16.8–18.4 % For pectins isolated by Kochetkov method.

High content of uronic acids and the relatively low level of monosaccharides in the acidic hydrolysates of the isolated polysaccharides suggest these compounds belong to the acidic polysaccharides of pectin class in which neutral

monosaccharides associated with uronic acids are hardly hydrolyzed with the formation of aldobi- and triuronic acids, due to the free monosaccharide content in hydrolysates is not high. **Keywords:** sphagnum peat; sphagnum moss; polysaccharides; pectins; monosaccharides; uronic acids.

For citation. Zhmakova N. A., Makarova N. L. Polysaccharides of sphagnum mosses and sphagnum peat with a low degree of decomposition. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 150–157.

Введение. Сфагновые мхи – типичные представители растений-торфообразователей месторождений верхового типа, являются богатым источником биологически активных веществ различной химической природы, которые в процессе торфообразования либо аккумулируются в торфе, либо служат источником более устойчивых химических соединений вторичного химического и микробного синтеза. Большая часть органического вещества сфагновых мхов и сфагнового торфа малой степени разложения представлена углеводными компонентами. Общее содержание простых углеводов и полисахаридов у грядовых мхов достигает 83 %, а у мочажинных – 86 %. При переходе на торфяную стадию в слабо разложившейся моховой массе при степени разложения (R) 5 % общее содержание углеводных составляющих в среднем снижается до 77 % у магелланикум-торфа и до 80 %, у фускум-торфа, а при достижении $R = 20$ % среднее суммарное содержание этих компонентов уменьшается до уровня в 61 % у магелланикум-торфа и 60 % у фускум-торфа [1].

Таким образом, сфагновые мхи и малоразложившийся сфагновый торф являются лабильным углеводсодержащим сырьем, большая часть органического вещества которого представлена полисахаридами различного строения – водорастворимыми, легкогидролизуемыми и трудногидролизуемыми полисахаридами.

Водорастворимые соединения, извлекаемые из сфагновых мхов и малоразложившегося сфагнового торфа, представлены как веществами углеводного характера – моносахаридами и пектинами, так и растворимыми в горячей воде химическими соединениями других классов – аминокислотами, органическими кислотами, биогенными аминами и рядом прочих [2].

К легкогидролизуемым соединениям относятся гемицеллюлозы – полисахариды, растворимые при кипячении в разбавленных растворах минеральных кислот. Количество легкогидролизуемых полисахаридов в сфагновых мхах и торфах малой степени разложения может достигать 55 % от их сухого вещества. Гидролиз гемицеллюлоз разбавленными растворами минеральных кислот приводит к расщеплению гликозидных связей, в результате чего происходит глубокая деструкция полисахаридов. Гидролизаты при этом содержат до 35 % редуцирующих веществ (РВ), среди них до 60 % моносахаридов, представленных глюкозой, маннозой, арабинозой, ксилозой, рамнозой, галактозой, а также уроновыми, органическими кислотами, аминокислотами и гуминоподобными веществами.

К трудногидролизуемым полисахаридам относятся целлюлоза и некоторые сопровождающие ее полисахариды, в основном ксилосманны. Содержание целлюлозы в сфагновых мхах и торфе составляет 15–25 % от органической массы [2, 3].

Макромолекулы полисахаридов – это полимеры, состоящие из моносахаридных единиц в пиранозной или фуранозной форме, уроновых кислот и представляющие прямые или разветвленные цепи различной длины, соединенные между собой α - или β -гликозидными связями. Полисахариды могут образовывать связи и с молекулами неуглеводного характера. Через гидроксильные, карбоксильные и аминные функциональные группы моносахаридных остатков они могут взаимодействовать с органическими и неорганическими кислотами, спиртами и другими соединениями, образуя сложноэфирные или амидные связи. Полисахариды растительных тканей могут быть представлены и более сложными биополимерами углевод-белкового и углевод-липидного характера. В сфагновых мхах и торфах присутствуют соединения класса липидов, белки и пептиды, в связи с чем можно предположить и наличие в их составе гликопротеинов и гликолипидов.

Отдельный класс представляют кислые полисахариды или полиурониды, наиболее характерными представителями которых являются пектины. Основу молекулы пектиновых веществ составляют остатки галактуроновой кислоты, соединенные α -1-4 гликозидными связями. Прямолинейные цепи полигалактуроновой кислоты могут разветвляться за счет присоединения боковых моно- и олигосахаридных остатков, включающих до 50 единиц нейтральных моносахаридов. Карбоксильные группы полигалактуроновой кислоты частично метилированы или частично связаны в виде солей металлов [4–6].

Согласно данным многих исследователей, фитополисахариды проявляют свойства антиоксидантов, обладают мембранопротекторным, иммуностимулирующим действием, проявляют бактерицидную, бактериостатическую, фунгицидную, фунгиостатическую, противовирусную и противоопухолевую активность. Они могут рассматриваться как перспективные объекты для создания биологически активных препаратов комплексного действия и длительного применения для медицины, ветеринарии, защиты и стимуляции роста растений [7–9].

Среди комплекса веществ углеводного строения сфагновых мхов и торфа малой степени разложения наибольший интерес представляют пектины, поскольку некоторые биологически активные, в том числе биоцидные, свойства сфагновых мхов можно связать с их наличием [4, 6].

Полисахариды сфагновых мхов и торфа, подверженные воздействию ультразвука, щелочных и окислительных агентов, увеличивают свою растворимость в воде, а также одновременно повышают антимикробные свойства и интерферогенную активность.

Материалы и методы исследований. Объектами исследований по выделению и характеристике полисахаридов сфагнового торфа и растений – торфообразователей сфагновых мхов являлись мхи *Sph. magellanicum* (сфагнум магелланикум) и *Sph. fuscum* (сфагнум фускум), а также сфагновый торф малой степени разложения (R) 10 % – сфагнум фускум и сфагнум магелланикум. Для исследований использовали фрезерный фускум-торф, отобранный из штабелей на поле 8а участка 8 торфопредприятия «Туршовка» Минской области. На этом торфяном месторождении были отобраны также два вида сфагнового мха. Магелланикум-торф отобран на поле 4 участка торфомассива «Сидень», карта 3 ПУ «Витебскторф» Витебской области.

При характеристике исходного сырья выделение основных групп полисахаридов сфагновых мхов и торфа проводили по методике, принятой для оценки группового химического состава верхового торфа низкой степени разложения в части выделения водорастворимых, легкогидролизуемых и трудногидролизуемых веществ, в том числе составляющих углеводного комплекса – РВ. Для определения массовой доли полисахаридов брали две параллельные навески каждого образца, которые предварительно обезбитуминировали, после чего остаток служил для последовательного выделения водорастворимых (5 ч, 96–98 °С), затем легкогидролизуемых веществ методом кислотного гидролиза 2%-ной серной кислотой на кипящей водяной бане в течение 5 ч, а потом трудногидролизуемых соединений – целлюлозы (для торфов после удаления гуминовых веществ) при гидролизе 80%-ной серной кислотой [3]. По этой же методике анализировали содержание этих групп полисахаридов в составе холоцеллюлозы.

Выделение холоцеллюлозы проводили в обезбитуминированных образцах торфа и мха путем делигнификации образцов 10%-ной надуксусной кислотой при температуре 65 °С в течение 10 мин. Для отделения гемицеллюлозы от целлюлозы полученные образцы холоцеллюлозы сфагновых мхов и торфа подвергали экстракции 18%-ным раствором гидроксида натрия. Затем щелочные растворы нейтрализовали уксусной кислотой до pH 4,0 и осаждали полисахариды пятикратным объемом этилового спирта. Выпавшие полисахариды отделяли декантированием, а затем центрифугированием, полученный остаток промывали на центрифуге спиртом и ацетоном [4].

Фракции легкогидролизуемых полисахаридов выделяли также по методу Кочеткова – экстракцией смесью 0,5%-ных растворов щавелевой кислоты и оксалата аммония в течение 2 ч при температуре 100 °С [10]. Предварительно из торфяного и растительного сырья удаляли водорастворимые полисахариды методом экстракции на водяной бане дистиллированной водой при температуре 80 °С в течение 2 ч. Водорастворимые фракции отбрасывали. Так как сфагновый мох и торф малой степени разложения отличаются малой относительной плотностью и высокой поглотительной способностью, гидромодуль для мха составил 1 : 38, для торфа – 1 : 12,5. Отфильтрованные растворы после экстракции гемицеллюлоз концентрировали упариванием и осаждали полисахариды 96%-ным этиловым спиртом в соотношении 1 : 5. Выпавшие в осадок полисахариды отделяли декантированием, а затем центрифугированием и промывали на центрифуге спиртом и ацетоном.

Содержание уроновых кислот в холоцеллюлозе устанавливали двумя независимыми методами: методом декарбоксилирования уроновых кислот горячей 19%-ной соляной кислотой и титриметрическим методом. По первому из них навески холоцеллюлоз нагревали с 19%-ной соляной кислотой при температуре 145 °С. Содержание уроновых кислот определяли по количеству выделившегося в результате декарбоксилирования углекислого газа, который поглощали титрованным 0,25 n раствором гидроксида натрия. Избыток щелочи титровали 0,1 n раствором соляной кислоты. По второму методу к навеске холоцеллюлозы добавляли избыток титрованного раствора щелочи. Через сутки непрореагировавшую щелочь титровали раствором серной кислоты в присутствии фенолфталеина [4].

Моносахаридный состав полисахаридов определяли методом кислотного гидролиза 2 М раствором трифторуксусной кислоты с последующей хроматографией гидролизатов.

Результаты исследований и их обсуждение. Для выделения полисахаридов использовали сфагновые торфа двух видов – сфагнум фускум и сфагнум магелланикум ($R = 10$ %), и соответствующие растения-торфообразователи – мхи *Sph. fuscum* (сфагнум фускум) и *Sph. magellanicum* (сфагнум магелланикум). Физико-химическая характеристика исходных проб представлена в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химическая характеристика исходных проб торфа и мха**Table 1. Physical and chemical characteristics of initial samples of peat and moss**

Номер образца	Вид торфа/мха	Массовая доля				pH
		влаги, %	сухого вещества, %	золы, %	органического вещества, % в СВ	
1	Магелланикум-торф	38,2	61,8	1,32	98,68	4,0
3	Фускум-торф	28,2	71,8	1,86	98,24	4,4
5	Магелланикум-мох	15,1	84,9	2,64	97,36	3,9
6	Фускум-мох	15,2	84,8	2,26	97,74	4,0

Образец магелланикум-торфа, отобранный из залежи и высушенный в лаборатории до воздушно-сухого состояния, отличается более высоким содержанием влаги, которая находится на уровне 38,2 %, а для фускум-торфа, отобранного из штабеля, содержание влаги составляет 28,2 %. По содержанию минеральных веществ образцы торфа существенно не разнятся, массовая доля золы в сухом веществе торфа составляет 1,32 и 1,86 % соответственно. Сфагновые мхи, отобранные на нативном торфяном месторождении и высушенные в лаборатории до воздушно-сухого состояния, имеют одинаковую влажность – 15,1–15,2 %, и близкий уровень содержания минеральных веществ – 2,26 и 2,64 %.

Характеристика углеводного комплекса исходного сырья представлена в табл. 2.

Таблица 2. Характеристика углеводного комплекса образцов сфагнового торфа и сфагновых мхов**Table 2. Characterization of a carbohydrate complex of samples of sphagnum peat and sphagnum mosses**

Вид сырья	Содержание компонентов, % на органическую массу			
	Магелланикум-торф (R = 10 %)	Фускум-торф (R = 10 %)	Магелланикум-мох	Фускум-мох
Водорастворимые вещества	5,8	6,5	6,9	7,8
В том числе РВ в них	1,5	1,8	1,7	2,2
Легкогидролизующие вещества	44,0	43,4	51,6	53,2
В том числе РВ в них	24,1	23,3	30,5	29,9
Трудногидролизующие вещества	21,3	22,6	26,8	24,4
В том числе РВ в них	20,5	21,9	25,3	24,2
Сумма гидролизующих веществ	71,1	72,5	85,3	85,4
В том числе РВ в них	46,1	47,0	57,5	56,3

Исследуемые сфагновые торфа низкой степени разложения характеризуются невысоким выходом водорастворимых веществ, которое составляет для магелланикум-торфа 5,8 %; для фускум-торфа – 6,5 %, присутствие этих соединений в соответствующих мхах несколько выше – 6,9 и 7,8 %. Водорастворимые соединения представлены моносахаридами, аминокислотами, органическими кислотами, аминами и рядом других химических соединений, растворимых в горячей воде. Следует отметить, что водорастворимые вещества включают в свой состав значительное количество редуцирующих сахаров (РВ), их доля в массе этих соединений для торфов и мхов составляет 24–28 %.

Как видно из полученных данных, магелланикум- и фускум-мхи богаты гемицеллюлозами, доля которых в органической массе составляет 51,6 и 53,2 % соответственно. Магелланикум- и фускум-торф являются несколько беднее этими соединениями по сравнению с растениями-торфообразователями, но содержание гемицеллюлоз в них также значительно и составляет порядка 43–44 %.

Содержание целлюлозы в составе органического вещества исследуемых мхов составляет 24,4 % для фускум-мха и 26,8 % для магелланикум-мха. Близким содержанием трудногидролизующих веществ отличается исследуемый торф (21,3 и 22,6 %). Достаточно высокое содержание трудногидролизующих веществ в торфах обусловлено незначительной степенью гумификации торфяного сырья (R = 10 %), в процессе которой происходит микробиологическая деградация целлюлозы, а также высоким содержанием этих соединений в химическом составе материнского вещества (биомасса сфагновых мхов).

Под воздействием гидролизующих агентов полисахариды торфа разрушают до низкомолекулярных соединений, представленных в основном моносахаридами, которые обладают редуцирующими свойствами, благодаря наличию альдегидной группы. Исследования гидролизатов сфагновых мхов показали, что значительная часть их органической массы представлена РВ. Их доля в легкогидролизующих углеводах составляет 56,2 % для фускум-мха и 59,1 % для магелланикум-мха. В гемицеллюлозах сфагновых торфов доля РВ несколько ниже – 53,7 и 54,8 % соответственно.

Трудногидролизуемые полисахариды в исследуемых сфагновых мхах на 94–99 % представлены РВ, а в торфах – на 96–97 %.

Суммарный выход соединений углеводного характера для исследуемых мхов составил 85,3–85,4 % от их органической массы за счет повышенного содержания наиболее лабильных компонентов – гемицеллюлоз и водорастворимых веществ. В торфах массовая доля этих соединений также очень велика, но значительно ниже, чем в растениях-торфообразователях, и составила 71,1–72,5 %.

Цель настоящего исследования – выделить полисахариды гемицеллюлоз из торфяного и растительного сырья. Полисахариды гемицеллюлоз связаны с другими компонентами растительных тканей – целлюлозой, лигнином, экстрактивными веществами, поэтому процесс их выделения является многостадийным. Полисахариды гемицеллюлоз растворимы в водных растворах щелочей разных концентраций, мочевины, щавелевой кислоты, щавелевокислого аммония, в диметилсульфоксиде и других растворителях.

В данной работе полисахариды выделяли двумя методами – из холоцеллюлозы экстракцией воднощелочным раствором и из исходного сырья смесью щавелевой кислоты и оксалата аммония после предварительного удаления водорастворимых полисахаридов (метод Кочеткова). В обоих случаях пектины осаждали из полученных растворов пятикратным объемом спирта.

Для выделения холоцеллюлозы необходимо провести делигнификацию торфяного и растительного сырья методом окисления лигнина. В качестве окислителей можно использовать водные растворы гидроперекиси ацетила, хлорита натрия, гидроперекиси ацетона и др.

Делигнификацию обесбитуминированного сырья проводили методом окисления образцов 10 %-ным раствором надуксусной кислоты. В полученных образцах холоцеллюлозы определяли содержание легко- и трудногидролизуемых веществ, негидролизуемого остатка и уоновых кислот.

Выход и характеристика образцов холоцеллюлозы, полученных из сфагновых мхов и торфа, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Выход и химическая характеристика выделенных образцов холоцеллюлозы

Table 3. Yield and chemical characteristics of isolated samples of holocellulose

Показатель	Фускум-мх	Магелланикум-мх	Фускум-торф	Магелланикум-торф
Выход холоцеллюлозы	89,5	86,9	80,7	79,8
Уроновые кислоты	20,6	20,4	19,2	18,5
Легкогидролизуемые вещества	61,5	60,8	59,3	57,1
Трудногидролизуемые вещества	20,4	21,3	19,4	20,8
Негидролизуемый остаток	16,3	17,1	14,6	15,4

Выход холоцеллюлозы из фускум-мха составил 89,5 %, из магелланикум-мха – 86,9 % от органической массы образца. Для сфагнового торфа со степенью разложения 10 % выход холоцеллюлозы несколько ниже: для фускум торфа – 80,7 %, для магелланикум-торфа – 79,8 % от органической массы.

Массовая доля уоновых кислот в холоцеллюлозе обоих мхов мха была практически одинаковой – 20,6 и 20,4 %. Содержание уоновых кислот в холоцеллюлозе торфов для фускум торфа – 19,2 %, магелланикум-торфа – 18,5 %.

Массовая доля легкогидролизуемых веществ в холоцеллюлозе фускум мха составила 61,5 %, из магелланикум-мха – 60,8, а в холоцеллюлозе торфов – 59,3 и 57,1 % соответственно.

Содержание трудногидролизуемых углеводов для всех образцов находилось на уровне 20 %. При этом наибольшим их содержанием характеризовалась холоцеллюлоза магелланикум-мха (21,3 %), а наименьшим – магелланикум-торфа (20,8 %).

Полисахариды выделяли из холоцеллюлозы щелочной экстракцией с последующим осаждением спиртом.

По методу Кочеткова полисахариды выделяли смесью растворов щавелевой кислоты и оксалата аммония из всех образцов исходного торфа и мха после удаления водорастворимых веществ. Из полученных растворов полисахариды также осаждали спиртом. Данные по выходу полисахаридов представлены в табл. 4.

Выход полисахаридов из холоцеллюлозы фускум-мха составил 5,0 % от органической массы холоцеллюлозы, или 5,3 % от органической массы мха; для магелланикум-мха – 4,4 и 4,9 % соответственно. Для сфагновых торфов выход полисахаридов значительно выше и составил 18,1 % от органической массы холоцеллюлозы фускум-торфа и 14,3 % холоцеллюлозы магелланикум-торфа, а на органическую массу торфа – 20,6 и 18,6 % соответственно.

Таблица 4. Выход полисахаридов из торфяного и растительного сырья**Table 4. Polysaccharide yield from peat and plant raw materials**

Сырье	Метод выделения	Выход полисахаридов, % на ОМ	
		холоцеллюлозы	исходного сырья
Фускум-мох	Из холоцеллюлозы	5,0	5,3
	По Кочеткову	–	1,2
Магелланикум-мох	Из холоцеллюлозы	4,4	4,9
	По Кочеткову	–	1,4
Фускум-торф	Из холоцеллюлозы	18,1	20,6
	По Кочеткову	–	4,2
Магелланикум-торф	Из холоцеллюлозы	14,3	18,6
	По Кочеткову	–	4,6

Выход полисахаридов, выделенных по методу Кочеткова, из фускум-мха составил 1,2 % от органической массы, для магелланикум-мха – 1,4 %. Для сфагновых торфов выход полисахаридов значительно выше и составил – 4,2 и 4,6 % соответственно.

Выделение полисахаридов по методу Кочеткова оказалось менее эффективным: по-видимому, была выделена лишь незначительная их фракция.

Методом кислотного гидролиза 2 М раствором трифторуксусной кислоты с последующей хроматографией гидролизатов изучен моносахаридный состав всех пектинов (табл. 5).

Таблица 5. Содержание моносахаридов в гидролизатах полисахаридов, % на сухую навеску**Table 5. Monosaccharide content in polysaccharide hydrolysates, % per dry weight**

Моносахарид	Метод выделения, сырье							
	из холоцеллюлозы				по методу Кочеткова			
	Фускум-мох	Магелланикум-мох	Фускум-торф	Магелланикум-торф	Фускум-мох	Магелланикум-мох	Фускум-торф	Магелланикум-торф
Галактоза	10,5	12,8	3,0	4,2	6,3	5,1	4,0	3,8
Глюкоза	11,4	8,4	8,7	7,9	6,5	6,8	4,6	4,2
Манноза	6,5	7,3	1,6	5,0	2,7	4,3	2,0	2,9
Арабиноза	4,2	3,6	3,4	2,1	2,5	2,6	1,5	2,4
Ксилоза	11,3	9,8	8,9	8,4	5,1	6,1	4,0	3,9
Рамноза	5,4	2,6	1,5	1,1	2,6	3,7	1,4	1,5
Суммарное содержание	49,3	44,5	27,1	28,7	25,6	28,6	17,5	18,7

Все полисахариды независимо от исходного сырья и метода выделения имеют одинаковый моносахаридный состав, но их суммарное содержание выше в образцах полисахаридов, выделенных из холоцеллюлозы мхов.

Определено содержание уроновых кислот в составе выделенных полисахаридов (табл. 6).

Таблица 6. Содержание уроновых кислот в образцах полисахаридов, % на органическое вещество**Table 6. Uronic acid content in polysaccharide samples, % organic matter**

Метод выделения	Сырье	Массовая доля уроновых кислот
Из холоцеллюлозы	Фускум-мох	20,1
	Магелланикум-мох	17,3
	Фускум-торф	19,5
	Магелланикум-торф	17,6
По методу Кочеткова	Фускум-мох	18,4
	Магелланикум-мох	17,3
	Фускум-торф	16,8
	Магелланикум-торф	18,1

Содержание уроновых кислот в органическом веществе полисахаридов, выделенных из холоцеллюлозы магелланикум-мха – 17,3 %, фускум-мха – 20,1 %. Массовая доля уроновых кислот в полисахаридах, выделенных из холоцеллюлозы торфов, находилось практически на том же уровне и составляло

17,6 и 19,5 % соответственно. Для пектинов, выделенных по методу Кочеткова, содержание уроновых кислот было несколько ниже, и находилось в пределах 17,3–18,4 для мхов и 16,8–18,1 для торфов.

Исходя из достаточно высокого содержания в составе полисахаридов уроновых кислот, можно предположить, что выделенные соединения относятся к кислым полисахаридам класса пектинов. Невысокое содержание моносахаридов в растворах гидролизатов полисахаридов можно объяснить тем, что нейтральные моносахариды, связанные с уроновыми кислотами, с трудом гидролизуются, причем гидролиз в основном происходит по гликозидным связям между нейтральными моносахаридами. При этом образуются альдоби- и триуроновые кислоты, а содержание моносахаридов невысокое.

Выводы.

1. Из холоцеллюлозы двух видов сфагнового мха (фускум и магелланикум) и двух соответствующих видов малоразложившегося торфа, а также из исходного торфяного и растительного сырья по методу Кочеткова выделено восемь образцов полисахаридов. Выход полисахаридов из холоцеллюлозы фускум-мха составил 5,3 %, для магелланикум-мха – 4,9 % от органической массы. Для сфагновых торфов выход пектинов значительно выше и составил 20,6 % для фускум-торфа и 18,6 % для магелланикум-торфа. Массовая доля полисахаридов, выделенных по методу Кочеткова, существенно ниже и составила для фускум-мха 1,2 %; для магелланикум-мха – 1,4, для фускум-торфа – 4,2, для магелланикум-торфа – 4,6 % от органической массы сырья.

2. Все полисахариды независимо от исходного сырья и метода выделения имеют одинаковый качественный моносахаридный состав. Невысокое содержание моносахаридов в растворах гидролизатов, по-видимому, связано с наличием в их составе уроновых кислот, так как гликозидные связи нейтральных моносахаридов с уроновыми кислотами гидролизуются с трудом. Установлено, что массовая доля уроновых кислот в образцах полисахаридов, выделенных из холоцеллюлозы мхов, составляет для магелланикум-мха 17,3 %, для фускум-мха – 20,1 % от органического вещества. В полисахаридах, выделенных из холоцеллюлозы торфов, содержание уроновых кислот находится практически на том же уровне – 17,6 и 19,5 % соответственно. Для пектинов, выделенных по методу Кочеткова, содержание уроновых кислот несколько ниже и находится в пределах 17,3–18,4 % от органического вещества для мхов и 16,8–18,1 % для торфов.

Список использованных источников

1. Наумова, Г. В. Торф в биотехнологии / Г. В. Наумова. – Минск : Наука и техника, 1987. – 125 с.
2. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова. – Минск : Беларуская навука, 2009. – 328 с.
3. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск, 1975. – 320 с.
4. Шарков, В. И. Химия гемицеллюлоз / В. И. Шарков, Н. И. Куйбина. – Л. : Лесная промышленность, 1972. – 440 с.
5. Химия биологически активных природных соединений / под ред. Н. А. Преображенского и Р. П. Евстигнеевой. – М. : Химия, 1976. – 512 с.
6. Биологически активные соединения различных видов сфагнового торфа / Г. В. Наумова [и др.] // Химия твердого топлива. – 2015. – № 3. – С. 8–13.
7. Дмитрук, В. Н. Фармакологическое исследование растений рода *Sphagnum* / В. Н. Дмитрук, М. В. Белоусов, Л. Г. Бабешина. – Германия : Lambert, 2011. – 261 с.
8. Исследование полисахаридов некоторых видов рода *Sphagnum* / Л. Г. Бабешина [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2011. – № 3. – С. 413–422.
9. Полисахариды из торфов и мхов / Н. В. Юдина [и др.] // Химия растительного сырья. – 1999. – № 4. – С. 97–100.
10. Химия углеводов / Н. К. Кочетков [и др.]. – М. : Химия, 1967. – 674 с.

References

1. Naumova G. V. *Torf v biotekhnologii* [Peat in biotechnology]. Minsk, Sci. and Tech. Publ., 1987, 125 p. (in Russian)
2. Tomson A. E., Naumova G. V. *Torf i produkty ego pererabotki* [Peat and the products of its proceeding]. Minsk, Belarus. Sci. Publ., 2009, pp. 56–141. (in Russian)
3. Lishtvan I. I., Korol' N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ih opredeleniya* [Basic properties of peat and methods of their determination]. Minsk, Sci. and Tech. Publ., 1975, 320 p. (in Russian)
4. Sharkov V. I., Kujbina N. I. *Himiya gemicellyuloz* [Chemistry of hemicelluloses]. Leningrad, Forestry Industry Publ., 1972, pp. 440 p. (in Russian)
5. Preobrazhenskiy R. P. and Evstigneeva N. A. (Eds.). *Himiya biologicheskii aktivnykh prirodnykh soedinenij* [Chemistry of biologically active natural compounds]. Moscow, Chem. Publ., 1976, 512 p. (in Russian)

6. Naumova G. V., Thomson A. E., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F. *Biologicheski aktivnye soedineniya razlichnykh vidov sfagnovogo torfa* [Biologically active compounds of various kinds of sphagnum peat]. *Himiya tverdogo topliva = Chemistry of Solid Fuels*, 2015, no. 3, pp. 8–13. (in Russian)
7. Dmitruk V. N., Belousov M. V., Babeshina L. G. *Farmakologicheskoe issledovanie rastenij roda Sphagnum* [Pharmacological study of plants of the genus *Sphagnum*]. Germany, Lambert Publ., 2011, 261 p. (in Russian)
8. Babeshina L. G., Gorina Y. V., Kolokolova A. P., Krasnov E. A., Karpova M. R. *Issledovanie polisaharidov nekotorykh vidov roda Sphagnum* [Study of polysaccharides of some species of the genus *Sphagnum*]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Himiya = J. of Siberian Federal University. Chemistry*, 2011, no. 3, pp. 413–422. (in Russian)
9. Yudina N. V., Pisareva S. I., Zvereva A. V., Dmitruk S. E., Kalinkina G. N. *Polisaharidy iz torfov i mhov* [Polysaccharides from peats and mosses]. *Himiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Materials*, 1999, no. 4, pp. 97–100. (in Russian)
10. Kochetkov N. K., Bochkov A. F., Dmitriev B. A., Usov A. I., Chizhov O. S., Shibaev V. N. *Himiya uglevodov* [Chemistry of carbohydrates]. Moscow, Chemistry Publ., 1967, 674 p. (in Russian)

Информация об авторах

Жмакова Надежда Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: zhmakova@mail.ru

Макарова Наталья Леонидовна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: nat.makarova05@gmail.com

Information about the authors

Nadezhda A. Zhmakova – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhmakova@mail.ru

Natalyia L. Makarova – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: nat.makarova05@gmail.com

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ИЗВЛЕЧЕНИИ ИЗ ТОРФА И БУРОГО УГЛЯ

Ю. Г. Янута, В. Н. Алейникова

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В работе представлен общетехнический и групповой состав исходного сырья. Приведены результаты изменения состава и свойств гуминовых веществ при их последовательной щелочной экстракции из торфяного сырья различного типа и бурого угля. Показано, что вид исходного сырья оказывает влияние на выход гуминовых веществ. Установлено, что выход гуминовых веществ из торфяного сырья менее выражен по сравнению с буроугольным сырьем: первое экстрагирование гуминовых веществ из торфяного сырья позволяет извлечь не более 30 мас.% от общего количества выделяемых гуминовых веществ. Для бурого угля данный показатель составляет около 50 мас.%. Представлены результаты элементного и термического анализов гуминовых веществ, выделенных из торфяного и буроугольного сырья.

Ключевые слова: гуминовые вещества; последовательное извлечение; каустобиолиты; групповой состав; элементный состав; термический анализ.

Для цитирования. Янута Ю. Г., Алейникова В. Н. Изменение состава и свойств гуминовых веществ при их последовательном извлечении из торфа и бурого угля // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 158–165.

CHANGE IN CONTENT AND PROPERTIES OF HUMIC SUBSTANCES DURING THEIR CONSISTENT EXTRACTION FROM PEAT AND BROWN COAL

Yu. G. Yanuta, V. N. Alejnikova

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

Abstract. The results of changes in the composition and properties of humic substances during their sequential extraction from peat and brown coal of various origin are presented. When extracting from peat raw materials during the first treatment, no more than 30 masses are extracted % of the content of humic substances. This figure is about 50 masses are extracted % for brown coal. It has been shown that depending on the raw material, the extraction of humic substances occurs unevenly. The results of elemental and thermal analyzes did not reveal significant differences in the structure of the fractions isolated sequentially from caustobiolites.

Keywords: humic substances; sequential extraction; caustobiolites; group composition; elemental composition; thermal analysis.

For citation. Yanuta Yu. G., Alejnikova V. N. Change in content and properties of humic substances during their consistent extraction from peat and brown coal. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 158–165.

Введение. Гуминовые вещества (ГВ) являются высокомолекулярными веществами, структурные особенности которых существенно зависят от исходного сырья и способа извлечения. Классическим способом извлечения ГВ является щелочная обработка гуматсодержащего сырья щелочными растворами. Данный метод нельзя отнести к препаративным, и при таком способе совместно с ГВ извлекаются и другие компоненты каустобиолитов – битумы, а для торфа и гидролизующиеся вещества. Последующее осаждение путем обработки минеральной кислотой приводит к определенной очистке экстрагированных ГВ. В промышленности используется лишь щелочная обработка каустобиолитов ввиду низких затрат на производство водорастворимых гуминовых препаратов. Как показано нами ранее [1], в твердом остатке после однократного извлечения жидких гуминовых препаратов остаются ГВ. Несмотря на применение данного подхода длительное время, вопрос об изменении состава и свойств извлекаемых ГВ не нашел полного отражения в литературе.

Известно, что ГВ, выделяемые из торфа и другого гуматсодержащего сырья, обладают значительной дисперсностью. Так, в работе [2] показано, что при извлечении ГВ из почвы с последующей их

сепарацией ультрацентрифугированием не удастся получить препараты с монораспределением по молекулярной массе. В ряде работ [3, 4] показано, что выделяемые препараты обладают значительными расхождениями по свойствам и для дальнейшего получения узкодисперсных фракций требуют дополнительной обработки. Извлечение ГВ на производстве, как правило, проводится в одну стадию с получением жидкого целевого продукта и нерастворимого в щелочном экстракте материала. При этом содержание ГВ в нем не оценивается.

Цель работы – изучить особенности изменения свойств ГВ при их последовательном извлечении из торфа и бурого угля.

Объекты и методы исследования. В качестве объекта исследований использован торф месторождений Республики Беларусь и бурых углей, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Общетеchnические свойства исходного сырья

Table 1. General technical properties of feedstock

Сырье	Место отбора, характеристики	Ботанический состав	Влажность, %	Зольность, %
Торф верховой	Месторождение Туршевка – Чертово, поле 8 ^а	Степень разложения 38 % Пушица – 70 Кора и древесина сосны – 25 Хитин – 5	81,8 ± 0,2	2,7 ± 0,2
Торф переходной	Месторождение Усяж	Береза – 20 Сосна – 20 Тростник Осоки Шейхцерия Сфагновый мох Песок	92,7 ± 0,1	5,0 ± 0,1
Торф низинный	Месторождение Туршевка – Чертово, поле 2	Степень разложения 30 % Тростник – 65 Осока – 35 Хитин (редко)	13,0 ± 0,2	6,5 ± 0,2
Бурый уголь	Житковичское месторождение, скважина 1189-12, глубина отбора 34,1–37,5 м	Ботанический состав не определяли	49,1 ± 0,1	16,2 ± 0,2

Определение влажности и зольности материала осуществляли согласно [5]. Ботанический состав исходного сырья определяли согласно [6]. Базовым методом определения группового состава каустобиолитов являлся метод Инсторфа [6]. При определении битумов в качестве растворителя использовали вместо спиртобензольной смеси нефрас С 80/120, что связано с меньшей токсичностью последнего. Групповой состав исходного сырья представлен в табл. 2.

Таблица 2. Групповой состав каустобиолитов

Table 2. Group composition of caustobiolites

Сырье	Битумы	Легко-гидролизующие	Гуминовые вещества	в том числе		Трудно-гидролизующие	Негидролизующие
				ГК	ФК		
Торф верховой	9,9	8,4	61,5	48,8	12,7	6,3	13,9
Торф низинный	3,0	18,1	57,1	37,7	19,4	3,0	18,8
Торф переходной	1,8	18,1	40,5	30,3	10,2	17,1	22,5
Бурый уголь	10,2	0	79,2	74,7	4,5	10,6	

Последовательное выделение ГВ осуществляли следующим образом: торфяное или буроугольное сырье после определения общетеchnических показателей обрабатывали 10%-ным раствором NaOH до pH суспензии 12,0. Гидромуль при этом на сухое беззольное вещество составлял 10. Нехватку воды для проведения исследований компенсировали введением дистиллированной. Смесь выдерживали в течение 24 ч при непрерывном перемешивании, после разделяли центрифугированием на

Sigma 4-16KS с использованием бакет-ротора при следующих параметрах: время разделения – 20 мин, частота вращения ротора – 4500 об/мин, g-фактор – 4152, температура разделения – 20 °С. После разделения фугат отделяли, определяли массу фугата, влажность и зольность согласно [5]. Из полученного фугата осаждали ГВ путем обработки последнего 10%-ным раствором хлористоводородной кислоты до pH системы 2,0 с последующим разделением центрифугированием при параметрах, описанных выше. Полученные ГВ переводили в H-форму путем диспергирования осадка в 5%-ном растворе хлористоводородной кислоты при соотношении осадок : раствор хлористоводородной кислоты, равном 1 : 5, отделении осадка на центрифуге, повторной обработкой 1%-ной кислотой при параметрах, описанных ранее. Финишную отмывку от раствора хлористоводородной кислоты осуществляли последовательным диспергированием осадка в дистиллированной воде при соотношении осадок : вода 1 : 5 и разделении суспензии. Процесс отмывки от хлористоводородной кислоты проводили двукратно или до момента, когда при разделении фугат не приобретал соломенной окраски, что свидетельствовало о растворении ГВ. Полученные таким образом препараты переносили в чашку Петри и высушивали в сушильном шкафу при температуре 40 °С.

Элементный состав полученных препаратов определяли на CHNOS-анализаторе Vario EL фирмы Elementar. Информация об элементном составе представлена в табл. 3.

Таблица 3. Элементный состав ГВ, выделенных последовательным извлечением из каустобиолитов

Table 3. Elemental composition of HS isolated by sequential extraction from caustobioliths

Сырье	Номер обработки	Содержание элементов, %					C/H	O/C
		C	H	N	S	O		
Торф верховой	1	50,00	6,15	2,55	0,24	41,06	0,68	0,62
	2	51,33	6,61	2,12	0,25	39,69	0,65	0,58
	3	51,79	5,65	2,07	0,20	40,29	0,76	0,58
	4	52,95	6,73	2,16	0,15	38,01	0,66	0,54
	5	52,33	6,99	2,73	0,15	37,80	0,62	0,54
Торф переходной	1	50,60	8,52	3,15	0,68	37,05	0,50	0,55
	2	50,38	8,25	3,17	0,65	37,55	0,51	0,56
	3	50,08	7,56	3,16	0,65	38,55	0,55	0,58
	4	50,49	8,74	3,23	0,64	36,90	0,48	0,55
	5	50,89	8,42	3,37	0,64	36,68	0,50	0,54
Торф низинный	1	48,64	5,66	2,55	0,38	42,77	0,72	0,66
	2	48,60	4,95	2,65	0,29	43,51	0,82	0,67
	3	48,53	5,56	2,73	0,26	42,92	0,73	0,66
	4	50,54	6,09	2,88	0,25	40,24	0,70	0,60
	5	48,81	5,58	2,77	0,20	42,64	0,73	0,66
Бурый уголь	1	52,52	7,07	0,83	0,58	39,00	0,62	0,56
	2	53,43	7,26	0,85	0,53	37,93	0,61	0,53
	3	52,89	7,99	0,81	0,53	37,78	0,55	0,54
	4	54,12	8,11	0,87	0,52	36,38	0,56	0,50
	5	51,27	7,68	0,70	0,45	39,90	0,56	0,58

Примечания.

1. Содержание кислорода определяли по разности C, H, N, S.
2. Параметры C/H и O/C представлены атомным соотношением элементов.

Термический анализ образцов проводили на дериватографе STA 2500 Regulus фирмы Netzsch. Параметры проведения исследований: газ носитель и защитный газ – N₂ с расходом 20 и 30 мл/мин соответственно, максимальная температура 900 °С, скорость подъема температуры – 10 °С/мин, начальная температура – 30 °С, время термостатирования при начальной температуре образца – 40 мин, материал тиглей – Pt, образец сравнения – Al₂O₃. Масса навески – 14 ± 0,5 мг. В исследованиях использовали открытый тигель. Кривые термического анализа ГВ представлены на рис. 1.

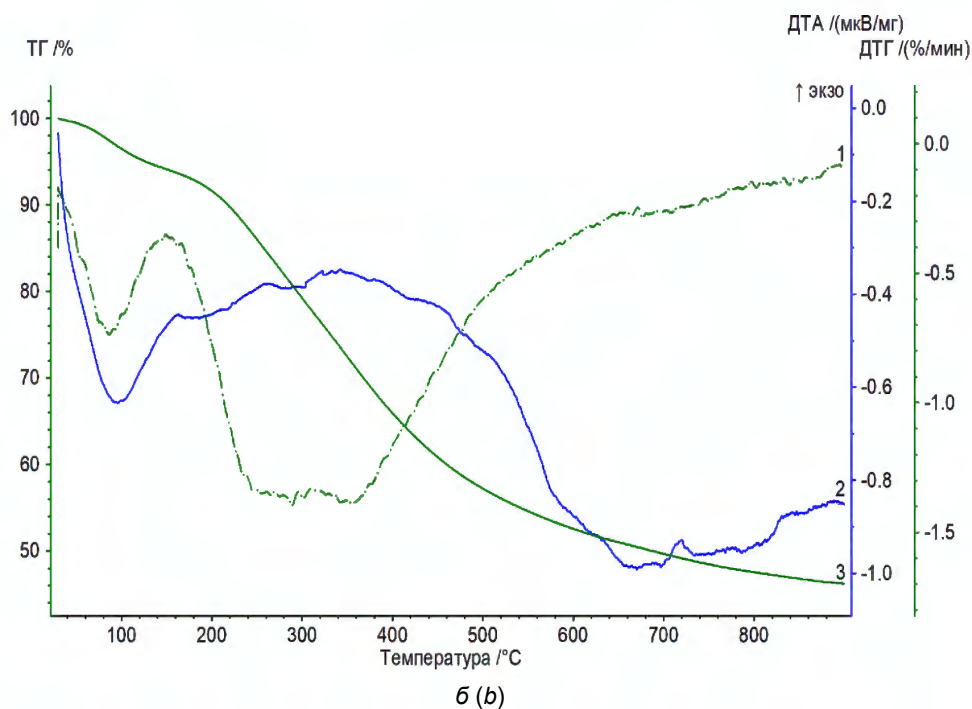
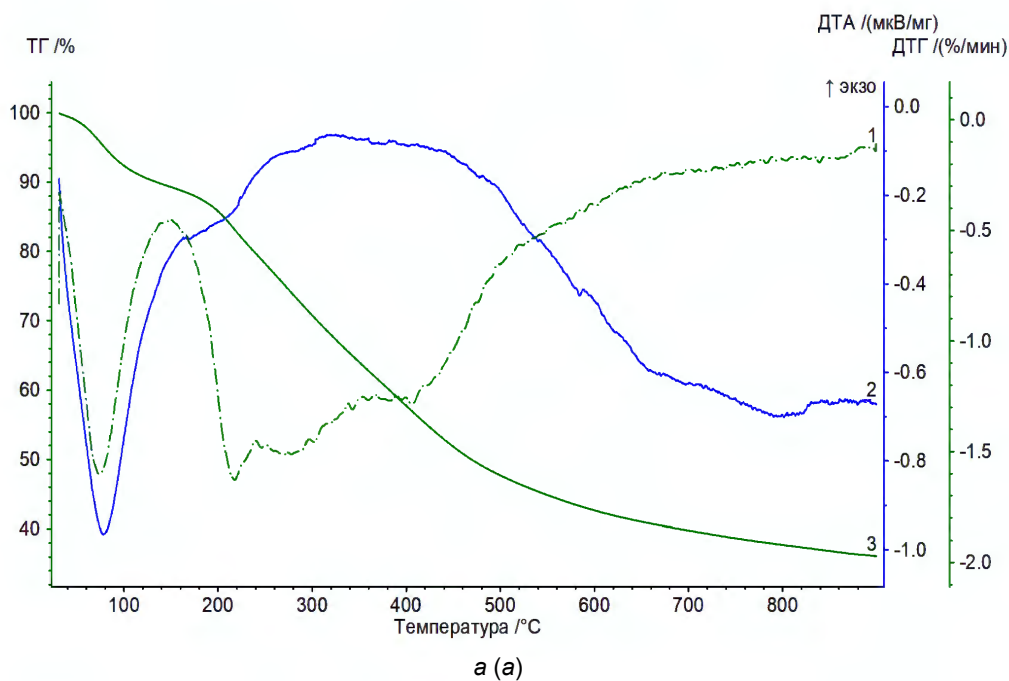
С помощью кривых ТГ можно оценить соотношение между термически лабильными и термически стабильной частью структуры ГВ. Термически неустойчивые фрагменты ГВ представлены периферической, как правило, алифатической частью, а устойчивые фрагменты – конденсированными структурами ядра макромолекулы ГВ.

Диапазоны, в которых авторы определяют потерю массы, различаются. Так, в работе [7] их определяют как соотношение масс изменяющихся в диапазоне температур 200–340 °С и 340–600 °С. Такой выбор, видимо, обусловлен использованием в качестве сырья для выделения ГВ бурого угля. Для ГВ,

выделенных из торфа, данный температурный диапазон смещен в более низкую область. В работе [8] авторы для определения используют температурные диапазоны 150–380 °C и 380–520 °C. В работе [9] соотношение между циклической и периферийной частями фракции ГК оценивают по отношению потерь массы в температурных интервалах 120–350 °C и 350–500 °C. Расчет параметра Z, согласно работе [10], производили по уравнению

$$Z = \frac{\Delta M_{350-500}}{\Delta M_{120-350}},$$

где $\Delta M_{350-500}$ и $\Delta M_{120-350}$ – потеря массы в интервале 350–500 °C и 120–350 °C соответственно, г.



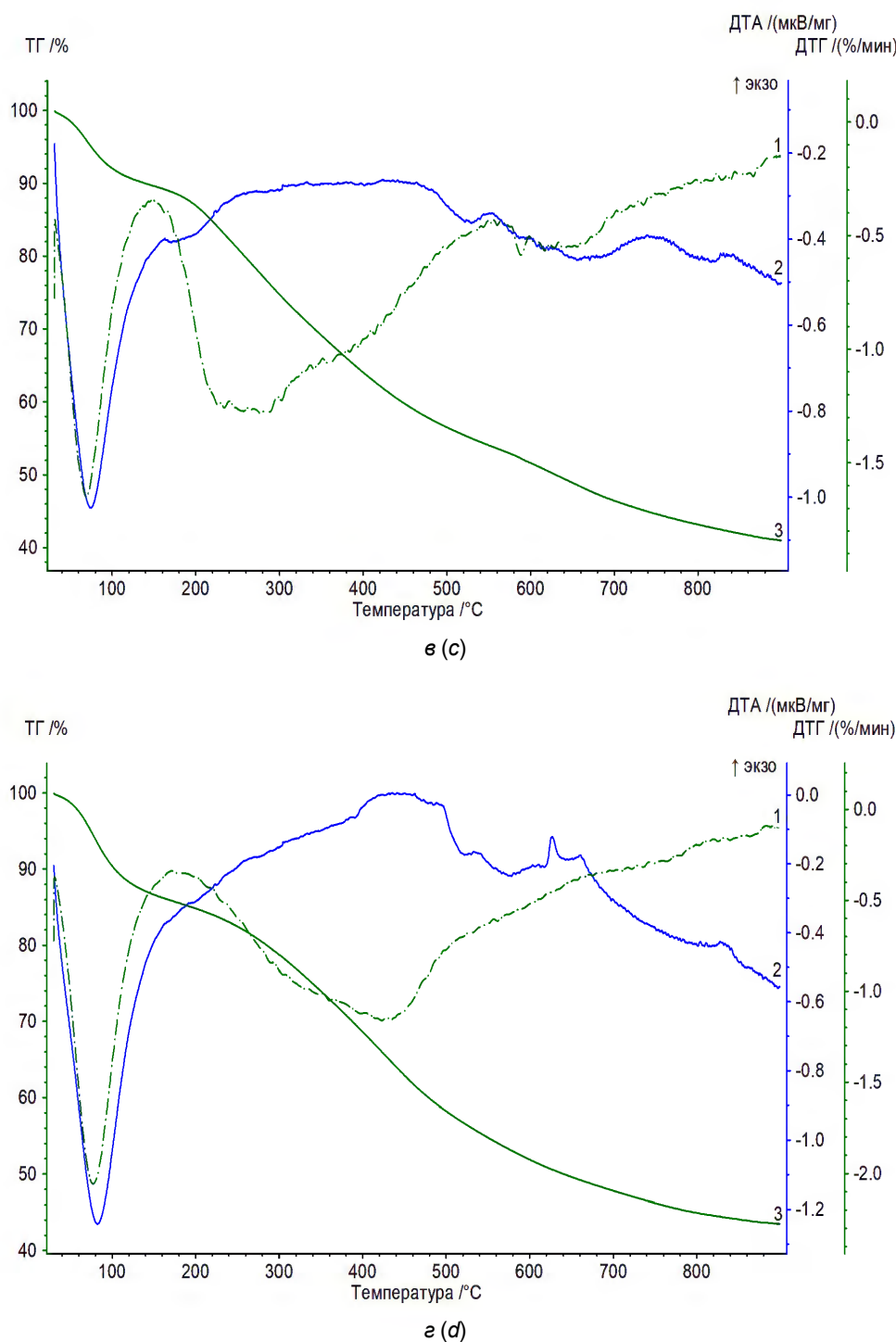


Рис. 1. Результаты дифференциального термического анализа:
1 – кривая дифференциальной потери массы (ДТГ) образца ГВ, выделенных
при первой обработке верхового (а), переходного (б), низинного (в) торфа и бурого угля (д);
2 – кривая дифференциальных тепловых эффектов (ДТА);
3 – интегральная кривая потери массы (ТГ) образца

Fig. 1. Results of differential thermal analysis:
1 – the curve of differential mass loss (DTG) of the sample of HS isolated
during the first treatment from the top (a), transition (b), low-lying (c) peat and brown coal (d);
2 – the curve of differential thermal effects (DTA);
3 – the integral curve of mass loss (TG) of the sample

Результаты и их обсуждение. Динамика изменения содержания элементов в образцах, полученных путем последовательной экстракции из каустобиолитов (см. табл. 3), не позволяет однозначно констатировать направленное изменение исследуемых параметров. Анализ зависимостей изменения содержания элементов от стадии обработки не выявил достоверных корреляций между ними. Вместе с тем можно отметить, что степень алифатичности ГВ, выделенных из бурых углей, ниже по сравнению с ГВ, выделенными из торфа. Данный факт обусловлен более длительным метаморфизмом бурых углей, а с учетом их отнесения к марке Б2, можно констатировать, что в структуре ГВ бурых углей преобладают конденсированные ароматические фрагменты, а степень окисленности (отношение О/С) находится в довольно узком диапазоне (граничные значения от 0,50 до 0,66), что не позволяет однозначно констатировать наличие значительных изменений в количественном и качественном содержании кислородсодержащих функциональных групп при последовательном извлечении ГВ из одного каустобиолита, а также из различных каустобиолитов.

Удельный выход ГВ при последовательном извлечении из различных каустобиолитов представлен на рис. 2.

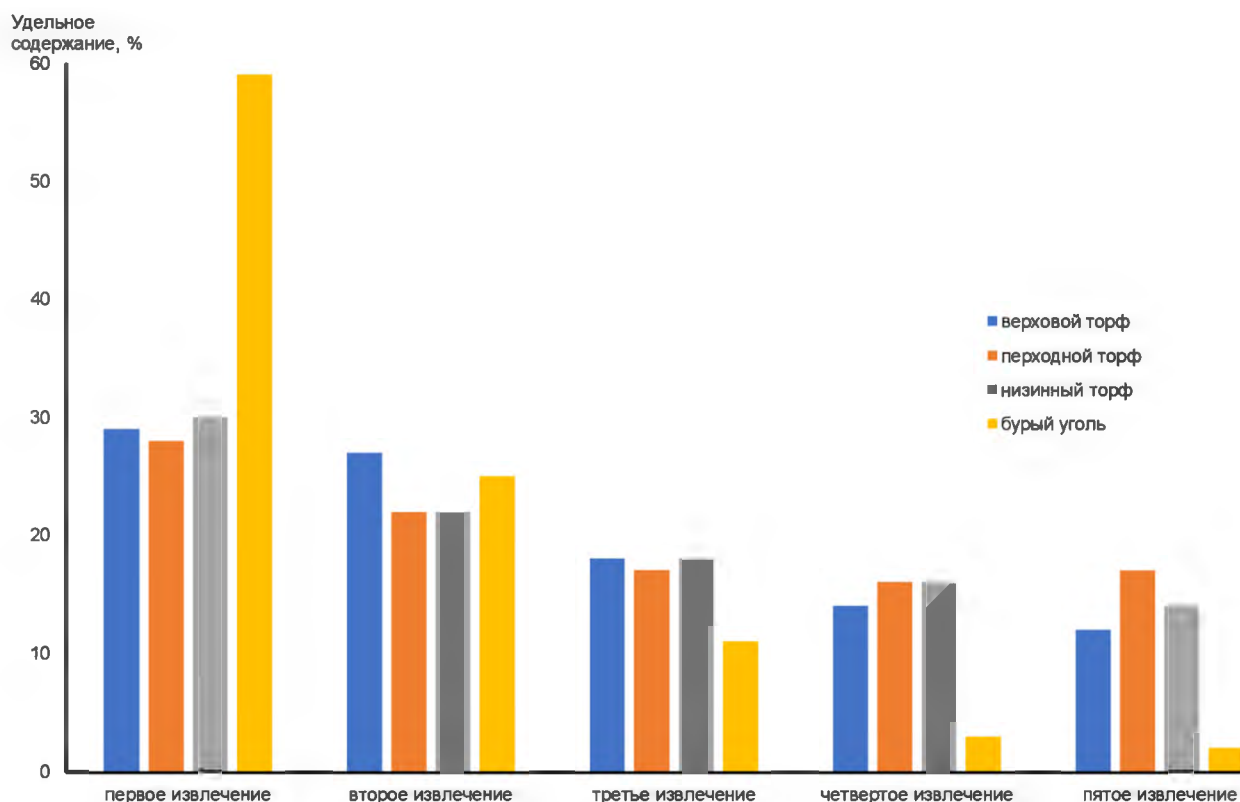


Рис. 2. Динамика извлечения ГВ из каустобиолитов

Fig. 2. Dynamics of HS extraction from caustobioliths

При таком способе экстракции в раствор переходят не только ГВ, но и другие водо- и щелочерастворимые соединения. Последующая кислотная обработка приводит к осаждению в первую очередь ГК, но при этом может наблюдаться соосаждение других компонентов, находящихся в растворе. В этой связи сравнивать информацию, приведенную на рис. 2, с данными табл. 3 можно с учетом высказанных допущений. Полученные данные (см. рис. 2) свидетельствуют, что при однократной обработке исходного сырья щелочным раствором, выход из торфяного сырья ГВ составляет не более 30 мас.%. Однократная обработка бурого угля позволяет перевести в раствор около 60 мас.% ГВ в пересчете на их органическую массу. Повторное извлечение ГВ при аналогичных условиях приводит вне зависимости от используемого сырья (торф, бурый уголь) к извлечению от 20 до 30 мас.% ГВ. Динамика изменения валового выхода ГВ в зависимости от кратности обработки для буроугольных ГВ выражена более отчетливо. Две последовательные обработки позволяют извлечь из бурого угля около 85 мас.% от общего количества извлекаемых ГВ, а три обработки – 95 %. Для торфяного сырья данный показатель находился на уровне 50 мас.% и 75 мас.% соответственно.

Потеря массы образцов по интервалам температур и параметр Z представлены в табл. 4.

Таблица 4. Потеря массы образцов ГВ при их последовательном извлечении из каустобиолитов в различных интервалах температур и параметр Z**Table 4. Loss of mass of HS samples during their sequential extraction from caustobioliths in different temperature ranges and parameter Z**

Сырье	Номер обработки	Потеря массы образца в интервале температур, %				Z
		30–120	120–350	350–500	500–900	
Торф верховой	1	9,16	26,77	16,33	11,57	0,61
	2	9,36	25,49	16,98	9,99	0,67
	3	8,13	27,94	18,01	9,49	0,64
	4	7,54	28,4	19,25	8,32	0,68
	5	4,38	26,67	16,18	8,36	0,61
Торф переходной	1	4,69	22,87	15,23	10,97	0,67
	2	5,27	26,27	17,51	11,92	0,67
	3	7,22	25,65	16,92	10,14	0,66
	4	6,83	27,6	18,78	10,22	0,68
	5	7,31	26,78	18,71	10,24	0,70
Торф низинный	1	9,13	21,65	12,63	15,53	0,58
	2	8,89	23,98	13,87	13,80	0,58
	3	4,90	23,88	15,42	13,82	0,65
	4	9,54	25,92	17,50	11,42	0,68
	5	8,57	24,52	16,65	11,18	0,68
Бурый уголь	1	11,62	14,38	15,70	14,73	1,09
	2	11,44	16,33	17,03	14,96	1,04
	3	11,85	12,49	14,59	17,70	1,17
	4	5,29	13,86	16,49	13,10	1,19
	5	7,63	15,06	17,47	12,32	1,16

Из табл. 4 следует, что сушка образцов при температуре 40 °С не приводит к полному удалению из них влаги вне зависимости от исходного сырья. Об этом свидетельствует значительная потеря массы всех исследованных образцов в диапазоне температур 30–120 °С, а также наличие эндотермического максимума в данном диапазоне на всех кривых ДТА термического анализа (см. рис. 1). Расчет параметра Z показал, что термическая устойчивость ГВ существенно зависит от исходного сырья. Так, при выделении ГВ из буроугольного сырья термическая стабильность выше, по сравнению с препаратами, извлекаемыми из торфяного сырья. Этот факт согласуется с данными о снижении алифатической периферической составляющей у ГВ, выделенных из каустобиолитов в ряду торф – бурый уголь – каменный уголь.

Заключение. Экспериментально показано, что при однократной обработке щелочью с гидромодулем 1 : 10 выход ГВ из торфяного сырья не превышает 30 мас.%. При использовании в качестве сырья бурого угля данный показатель составляет около 60 мас.%. Повторное выделение приводит к переходу в раствор от 20 до 30 мас.% ГВ. Последующая обработка приводит к снижению перехода ГВ в раствор. Данная динамика для торфяного сырья выражена менее четко, чем для бурого угля, из которого выделяется около 85 мас.% от общего количества извлекаемых ГВ. Для торфяного сырья данный показатель в исследования находился на уровне 50 мас.%

Показано, что свойства ГВ, извлекаемые путем последовательной обработки каустобиолитов, практически не отличаются по содержанию элементов, их соотношению и термической устойчивости.

Список использованных источников

1. Першай, Н. С. Новый сорбционный материал из остатков торфа и бурого угля / Н. С. Першай, Ю. Г. Янута // Природопользование. – 2019. – № 2. – С. 264–273.
2. Ширшова, Л. Т. Полидисперсность гумусовых веществ почв / Л. Т. Ширшова. – М. : Наука, 1991. – 85 с.
3. Особенности химического состава и структуры гуминовых кислот, выделенных последовательной экстракцией торфа пирофосфатом и гидроксидом натрия / В. В. Марыганова [и др.] // Химия твердого топлива. – 2006. – № 3. – С. 3–11.
4. Лаврик, Н. Л. Изучение полидисперсных свойств молекул гуминовых кислот с помощью люминесцентной спектроскопии / Н. Л. Лаврик // Химия в интересах устойчивого развития. – 2003. – Т. 11, № 5. – С. 751–753.
5. Торф. Методы определения влаги и зольности : СТБ 2042-2010. – Минск : Госстандарт, 2010. – 14 с.
6. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1976. – 318 с.

7. Федорова, Н. И. Термоустойчивость бурых углей различных месторождений России и Монголии / Н. И. Федорова, Л. М. Хицова, З. Р. Исмагилов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2019. – № 27. – С. 669–676.
8. Марыганова, В. В. Термический анализ гуминовых кислот почв под лесополосами различного возраста в агроландшафте / В. В. Марыганова, Л. Шайдак, Л. Ю. Цынкалова // Природопользование. – 2010. – № 18. – С. 185–191.
9. Мазина, О. И. Изучение гуминовых кислот тростникового торфа методом термического анализа / О. И. Мазина [и др.] // Весті АН БССР. Сер. хім. навук. – 1982. – № 1. – С. 85–94.
10. Дударчик, В. М. Основные закономерности взаимодействия гумусовых веществ торфа с глинистыми минералами : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.05 / В. М. Дударчик. – Минск, 1988. – 209 с.

References

1. Pershay N. S., Yanuta Yu. G. *Novyy sorbtsionnyy material iz ostatkov torfa i burogo uglya* [New sorption material from peat and brown coal residues]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2019, no. 2, pp. 264–273. (in Russian)
2. Shirshova L. T. *Polidispersn'ost' gumusovykh veshchestv pochv* [Polydispersity of humic substances in soils]. Moscow, 1991, 85 p. (in Russian)
3. Maryganova V. V. [et al.]. *Osobennosti khimicheskogo sostava i struktury guminovykh kislot, vydelennykh posledovatel'noy ekstraktsiyey torfa pirofosfatom i gidroksidom natriya* [Features of the chemical composition and structure of humic acids isolated by sequential extraction of peat with pyrophosphate and sodium hydroxide]. *Khimiya tverdogo topliva = Chemistry of solid fuels*, 2006, no. 3, pp. 3–11. (in Russian)
4. Lavrik N. L. *Izucheniye polidispersnykh svoystv molekul guminovykh kislot s pom'oshch'yu lyuminescentnoy spektroskopii* [Study of polydisperse properties of humic acid molecules using luminescent spectroscopy]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya = Chemistry for sustainable development*, 2003, no. 5, pp. 751–753. (in Russian)
5. STB 2042-2010. *Torf. Metody opredeleniya vlagi i zol'nosti* [State Standard of Belarus 2042-2010. Peat. Methods for determining moisture and ash content]. Minsk, 2010, 14 p. (in Russian)
6. Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnyye svoystva torfa i metody ikh opredeleniya* [Basic properties of peat and methods for their determination]. Minsk, 1976, 318 p. (in Russian)
7. Fedorova N. I., Khitsova Z. R., Ismagilov L. M. *Termoustoychivost' burykh ugley razlichnykh mestorozhdeniy Rossii i Mongolii* [Thermal stability of brown coals from various deposits in Russia and Mongolia]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya = Chemistry for sustainable development*, 2019, no. 27, pp. 669–676. (in Russian)
8. Maryganova V. V., Shaidak L., Tsinkalova L. Yu. *Termicheskiy analiz guminovykh kislot pochv pod lesopolosami razlichnogo vozrasta v agrolandshafte* [Thermal analysis of humic acids in soils under forest belts of various ages in the agricultural landscape]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2010, no. 18, pp. 185–191. (in Russian)
9. Mazina O. I. [et al.]. *Izucheniye guminovykh kislot trostnikovogo torfa metodom termicheskogo analiza* [Study of humic acids of reed peat by thermal analysis]. *Vestsi AN BSSR. Ser. khim. navuk*, 1982, no. 1, pp. 85–94. (in Russian)
10. Dudarchik V. M. *Osnovnyye zakonomernosti vzaimodeystviya gumusovykh veshchestv torfa s glinistymi mineralami. Diss. ... kand. tekhn. nauk* [Basic patterns of interaction of humic substances in peat with clay minerals. Dr. cand. tech. sci. diss.]. Minsk, 1988, 209 p. (in Russian)

Информация об авторах

Янута Юрий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по науке, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanuta@tut.by

Алейникова Вера Николаевна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь)

Information about the authors

Yuriy G. Yanuta – Ph. D. (Technical), docent, Deputy Director for Science, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanuta@tut.by

Vera N. Alejnikova – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus)

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ
SCIENTIFIC REPORTS

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-166-170>
УДК 349.6

Поступила в редакцию 21.10.2023
Received 21.10.2023

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
В ОБЛАСТИ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ

Ю. В. Бондаренко¹, А. А. Борисов², Е. А. Ботян³,
Н. А. Кулевская³, Б. В. Французов⁴, Ю. Н. Чупрова²

¹Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия;

²Уральский государственный научно-исследовательский институт
региональных экологических проблем, Пермь, Россия;

³Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие
«Бел НИЦ «Экология», Минск, Беларусь;

⁴Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. В статье исследуется на формально-юридической основе законодательство Российской Федерации и Республики Беларусь в части обращения с отходами с акцентом на сравнение понятийного аппарата, системы государственного регулирования, государственного и общественного контроля (надзора) в области обращения с отходами, ответственности за экологические правонарушения.

Ключевые слова: отходы производства и потребления; понятийный аппарат; институт общественных инспекторов по охране окружающей среды; формально-юридический метод; элементы сравнительного анализа.

Для цитирования. Бондаренко Ю. В., Борисов А. А., Ботян Е. А., Кулевская Н. А., Французов Б. В., Чупрова Ю. Н. Сравнительный анализ законодательства Российской Федерации и Республики Беларусь в области обращения с отходами// Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 166–170.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE LEGISLATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION AND THE REPUBLIC OF BELARUS
IN THE FIELD OF WASTE MANAGEMENT

Yu. V. Bondarenko¹, A. A. Borisov², E. A. Botyan³,
N. A. Kulevskaya³, B. V. Frantsuzov⁴, Yu. N. Chuprova²

¹Kuban State University, Krasnodar, Russia;

²Ural State Research Institute of Regional Environmental Problems, Perm, Russia;

³The Republic Scientific and Research Unitary Enterprise "Bel RSC "Ecology", Minsk, Belarus;

⁴Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

Abstract. The article examines, on a formal legal basis, the legislation of the Russian Federation and the Republic of Belarus in terms of waste management, with an emphasis on comparing the conceptual apparatus, the system of state regulation, state and public control (supervision) in the field of waste management, and liability for environmental violations.

Keywords: production and consumption waste; conceptual apparatus; institute of public environmental inspectors; formal legal method; elements of comparative analysis.

For citation. Bondarenko Yu. V., Borisov A. A., Botyan E. A., Kulevskaya N. A., Chuprova Yu. N. Comparative analysis of the legislation of the Russian Federation and the Republic of Belarus in the field of waste management. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 166–170.

Введение. Сравнительно-правовые исследования занимают особое место в современной юридической науке, что обусловлено процессами глобализации, формирования единого правового пространства и политически определяемыми тенденциями к гармонизации национальных законодательств.

В рамках Союзного государства с 2018 по 2022 г. согласно постановлению Высшего Государственного Совета Союзного государства от 19 июня 2018 г. № 3 [1] первоочередной задачей при углублении интеграционных процессов обозначена координация сближения законодательства Российской Федерации и Республики Беларусь. Отметим, что при проведении гармонизации необходимо выделить и сравнить правовые акты двух стран, регулирующие определенную сферу деятельности.

Основная часть. Принимая во внимание, что в рамках данного исследования центральным объектом анализа выбрана область обращения с отходами производства и потребления в России и Беларуси, ключевыми правовыми актами для сравнения являются Федеральный закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ (далее – Закон № 89-ФЗ) [2] и Закон Республики Беларусь от 20 июля 2007 г. № 271-З «Об обращении с отходами» (далее – Закон № 271-З) [3].

Выявление актуальных проблем в области обращения с отходами на территории Российской Федерации и Республики Беларусь – крупный блок вопросов, подлежащих предварительному сбору, классификации и анализу с целью проведения проблемно-правового сравнения. На данной стадии изучения заданной проблематики считаем рациональным провести нормативное сравнение, чтобы определить действующие правовые механизмы, их особенности, преимущества и недостатки.

В соответствии со статьей 2 Закона № 89-ФЗ правовое регулирование осуществляется на основе федерального закона, правовых актов Российской Федерации, ее субъектов и муниципальных образований. В части 1 статьи 2 Закона № 271-З определено, что законодательство в области обращения с отходами состоит из актов Президента Республики Беларусь и иных актов, а также международных договоров.

Стоит отметить, что системы правового регулирования в России и Беларуси отличаются по причине различия форм государственного устройства: в Российской Федерации установлены принципы федеративного государственного устройства, в Республике Беларусь – унитарного устройства.

С учетом приведенных доводов возникает вопрос, как провести сравнительно-правовой анализ двух достаточно крупных законов, регулирующих отношения одной сферы в разных государственных устройствах. В его основе лежит один из часто применяемых эмпирических методов познания – сравнение, посредством которого в объектах исследования выявляются общие и особенные признаки.

Сегодня в литературе выделяют такие виды сравнения, актуальные для настоящего исследования:

- 1) нормативное (формально-юридическое);
- 2) функциональное (проблемно-правовое).

Формально-юридическое сравнение базируется на дефинитивном аппарате и правовых институтах. При исследовании сопоставимых элементов в них вкладывается идентичный правовой смысл. Однако в данном случае исследователи сталкиваются с такой сложностью, при которой формально равноценные правовые явления в разных правовых системах могут расходиться по своему содержанию. Кроме того, стоит особо отметить корректность функционирования правовых механизмов при федеративном и унитарном государственном устройстве, а также возможность регулирования однородных общественных отношений различными отраслями права.

Предпосылкой для функционального сравнения является выявление социальных, политических, экономических, правовых проблем и поиск способов их решения. В данном случае сравнимыми считаются не конкретные правовые нормы и институты, а возможные приемы регулятивного воздействия на выявленные проблемы с целью выработки эффективных механизмов их разрешения [4, с. 28–29].

Результаты формально-юридического сравнения могут быть положены в основу функционального анализа, поскольку указанные итоговые данные позволят спроектировать инструменты решения актуальных проблем и объективно оценить, какие методы регулятивного воздействия и в каком формате могут быть без издержек имплементированы в той или иной правовой системе.

Применение и формально-юридического, и проблемно-правового сравнения требует соблюдения базовых правил, которые сформулировала Н. А. Чернядьева в статье «Общие вопросы применения сравнительного метода в юридической науке», например:

- 1) для объектов / предметов сравнения характерно наличие общих черт, сходной структуры, целей, задач и функций;
- 2) при изучении правовых элементов необходимо оценивать их статичное и эволюционное состояние, а также учитывать исторические, политические, социально-экономические условия формирования и развития сравниваемых институтов [4, с. 26].

Принимая во внимание перечисленные общие правила, целесообразно в качестве элементов сравнительного правового анализа выделить:

- 1) государственное регулирование;
- 2) общие положения, включая основные понятия и принципы;
- 3) экономические аспекты управления отходами;
- 4) элементы, ответственные за нарушение законодательства;
- 5) государственный надзор и контроль.

В Российской Федерации понятие «отходы» равнозначно понятию «отходы производства и потребления», определяемому как вещества и предметы, образованные в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления, которые удаляются, предназначены для удаления или подлежат удалению в соответствии с *Законом № 89-ФЗ*.

В Республике Беларусь в соответствии со статьей 1 Закона № 271-З понятие «отходы» определено как вещества и предметы, образующиеся в процессе осуществления экономической деятельности, жизнедеятельности человека и не имеющие определенного предназначения по месту их образования, либо утратившие полностью или частично свои потребительские свойства.

В той же статье отходы дифференцированы на отходы потребления и производства. В первом случае под данным термином понимаются отходы, образующиеся в процессе жизнедеятельности человека (за исключением экономической деятельности), в потребительских кооперативах и садоводческих товариществах, а также смет на землях общего пользования. Во втором случае – отходы, образующиеся в процессе осуществления юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями экономической деятельности, побочные и сопутствующие продукты добычи и обогащения полезных ископаемых.

Особого внимания заслуживает анализ понятия «обращение с отходами». Если в Российской Федерации согласно статье 1 Закона № 89-ФЗ рассматриваемое понятие определено как деятельность по сбору, накоплению, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов, то в Республике Беларусь в соответствии со статьей 1 Закона № 271-З – как деятельность, связанная с образованием отходов, их сбором, разделением по видам отходов, подготовкой, удалением, хранением, захоронением, перевозкой, обезвреживанием и (или) использованием отходов.

Основные принципы в области обращения с отходами имеют общие черты, некоторые из базовых постулатов равнозначны, например: применение наилучших доступных технологий, обеспечение доступа к информации, использование экономических методов регулирования.

Статья 21 Закона № 89-ФЗ посвящена таким принципам экономического регулирования, как: во-первых, уменьшение количества отходов и вовлечение их в хозяйственный оборот; во-вторых, платность размещения отходов; в-третьих, экономическое стимулирование.

Рассматривая вопросы экономического регулирования, остановимся на системе органов власти, наделенных полномочиями в области обращения с отходами. Глава II Закона № 89-ФЗ распределяет полномочия с учетом особенностей федеративного устройства между федеральными, региональными и муниципальными органами власти, предусматривая возможность перераспределения функций в соответствии со статьей 8.1.

В Республике Беларусь государственное регулирование и управление осуществляют Президент, Совет Министров и министерства, полномочия которых определены в главе 2 Закона № 271-З. В управлении отходами принимают участие местные Советы депутатов, исполнительные и распорядительные органы, компетенции которых закреплены в статье 12 Закона № 271-З.

Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, а также его территориальные органы в соответствии с пунктом 1 статьи 36 Закона № 271-З осуществляют государственный контроль в области обращения с отходами. Кроме государственного контроля для регулирования сферы обращения с отходами в Республике Беларусь предусмотрен государственный санитарный надзор. Согласно пункту 2 статьи 36 Закона № 271-З и статье 32 Закона Республики Беларусь от 7 января 2012 г. № 340-З «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» [5] государственный санитарный надзор проводят определяемые Советом Министров Республики Беларусь органы и учреждения, например, Министерство здравоохранения Республики Беларусь, государственное учреждение «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья» и другие центры.

Закон № 89-ФЗ не содержит положений о государственном контроле в области обращения с отходами, однако при обращении к основополагающему Федеральному закону от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (далее – Закон № 7-ФЗ) [6] стоит обратить внимание на статью 65, регламентирующую государственный экологический контроль (надзор). Предметом государственного экологического контроля (надзора) является соблюдение обязательных требований, содержащихся и установленных в Законе № 89-ФЗ.

С одной стороны, законодатели при разработке Закона № 89-ФЗ обошли стороной закрепление государственного экологического надзора (контроля), а с другой – ввели такие инструменты, как государственный контроль (надзор) в области регулирования тарифов в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами и общественный контроль, детально описанный в статье 68 Закона № 7-ФЗ.

В соответствии с пунктом 4 статьи 68 Закона № 7-ФЗ граждане, принявшие решение оказывать содействие органам государственного надзора в природоохранной деятельности на добровольной и безвозмездной основе, могут осуществлять общественный контроль в статусе общественных инспекторов. Порядок организации деятельности общественных инспекторов по охране окружающей среды утвержден приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 12 июля 2017 г. № 403 [7].

Подводя итог анализа государственного и общественного контроля (надзора), отметим, что так или иначе оцениваемый инструмент направлен на выявление фактов совершения правонарушений в области обращения с отходами с целью привлечения к ответственности.

Принцип ответственности закреплен в статье 4 и детализирован в статье 37 Закона № 271-3 посредством выделения видов ответственности, таких как гражданско-правовая, административная, уголовная и иная. Закон № 89-ФЗ подобного принципа не содержит, однако статья 28 помимо вышеуказанных аналогичных видов ответственности закрепляет также дисциплинарную ответственность, устанавливаемую в виде дисциплинарных взысканий (замечание, выговор, увольнение) [8].

Заключение. Подводя итоги проведения сравнительно-правового анализа законодательства России и Беларуси в области обращения с отходами на формально-юридической основе можно сделать вывод о том, что сегодня подходы к определению понятий «отходы» и «обращение с отходами» требуют унификации, а также существует необходимость детального изучения конкретных видов деятельности, включенных в термин «обращение с отходами» в России и Беларуси. Целесообразно осуществить проведение дополнительной оценки эффективности экономических инструментов, регулирующих сферу обращения с отходами с целью выявления эффективных и неэффективных мер и гармонизации законодательства в области обращения с отходами.

Список использованных источников

1. О выполнении Приоритетных направлений и первоочередных задач дальнейшего развития Союзного государства на среднесрочную перспективу (2014–2017 годы) и дальнейшем развитии Союзного государства на 2018–2022 годы : постановление Высшего Государственного Совета Союзного государства, 19 июня 2018 г., № 3 // СПС КонсультантПлюс. Беларусь.
2. Об отходах производства и потребления : Фед. Закон, 24 июня 1998 г., № 89-ФЗ // СПС КонсультантПлюс. Россия.
3. Об обращении с отходами : Закон Респ. Беларусь, 20 июля 2007 г., № 271-3 // СПС КонсультантПлюс. Беларусь.
4. Чернядьева, Н. А. Общие вопросы применения сравнительного метода в юридической науке / Н. А. Чернядьева [Электронный ресурс] // Правопорядок: история, теория, практика. – 2021. – № 4 (31). – С. 23–30. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/obschie-voprosy-primeneniya-sravnitel'nogo-metoda-v-yuridicheskoy-nauke>. – Дата доступа: 20.09.2023.
5. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения : Закон Респ. Беларусь, 7 янв. 2012 г., № 340-3 // СПС КонсультантПлюс. Беларусь.
6. Об охране окружающей среды : Фед. Закон, 10 янв. 2002 г., № 7-ФЗ // СПС КонсультантПлюс. Россия.
7. Об утверждении порядка организации деятельности общественных инспекторов по охране окружающей среды : приказ Минприроды России, 12 июля 2017 г., № 403 // СПС КонсультантПлюс. Россия.
8. Трудовой кодекс Российской Федерации : 30 дек. 2001 г. № 197-ФЗ // СПС КонсультантПлюс. Россия.

References

1. *O vypolnenii Prioritetnykh napravlenij i pervoocherednykh zadach dal'nejshogo razvitiya Soyuznogo gosudarstva na srednesrochnuyu perspektivu (2014–2017 gody) i dal'nejshem razvitii Soyuznogo gosudarstva na 2018–2022 gody* [On the implementation of the Priority Directions and Priority Tasks for the Further Development of the Union State in the Medium Term (2014–2017) and the Further Development of the Union State for 2018–2022]. *Postanovlenie Vysshego Gosudarstvennogo Soveta Soyuznogo gosudarstva ot 19 iyunya 2018 g. № 3* [Decree of the Supreme State Council of the Union State dated 19 June 2018, no. 3]. *SPS ConsultantPlus. Belarus*. (in Russian)
2. *Ob otkhodakh proizvodstva i potrebleniya* [On Production and Consumption Wastes]. *Federal'ny'j zakon ot 24 iyunya 1998 g. № 89-FZ* [Federal Law dated 24 June 1998, no. 89-FZ]. *SPS ConsultantPlus. Russia*. (in Russian)

3. *Ob obrashenii s otkhodami* [On Waste Management]. *Zakon Respubliki Belarus` ot 20 iyulya 2007 g. № 271-Z* [Law of the Republic of Belarus dated 20 July 2007, no. 271-Z]. *SPS ConsultantPlus. Belarus*. (in Russian)
4. Chernyadeva N. A. *Obshie voprosy primeneniya sravnitel'nogo metoda v yuridicheskoy nauke* [General questions of application of the comparative method in legal science]. *Law order: history, theory, practice*, 2021, no. 4 (31), pp. 23–30. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obshie-voprosy-primeneniya-sravnitel'nogo-metoda-v-yuridicheskoy-nauke> (accessed 20 September 2023). (in Russian)
5. *O sanitarno-e'pidemiologicheskoy blagopoluchii naseleniya* [On the sanitary and epidemiological welfare of the population]. *Zakon Respubliki Belarus` ot 7 yanvarya 2012 g. № 340-Z*. [Law of the Republic of Belarus dated 7 January 2012, no. 340-Z]. *SPS Consultant Plus. Belarus*. (in Russian)
6. *Ob okhrane okruzhayushhej sredy* [On Environmental Protection]. *Federal'nyj zakon ot 10 yanvarya 2002 g. № 7-FZ* [Federal Law dated 10 January 2002, no. 7-FZ]. *SPS ConsultantPlus. Russia*. (in Russian)
7. *Ob utverzhdenii poryadka organizacii deyatel'nosti obshestvennykh inspektorov po okhrane okruzhayushhej sredy* [On approval of the procedure for organizing the activities of public environmental inspectors]. *Prikaz Minprirody Rossii ot 12 iyulya 2017 g. № 403* [Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 12 July 2017, no. 403]. *SPS ConsultantPlus. Russia*. (in Russian)
8. *Trudovoj kodeks Rossijskoj Federacii ot 30 dekabrya 2001 g. № 197-FZ* [Labor Code of the Russian Federation dated 30 December 2001, no. 197-FZ]. *SPS ConsultantPlus. Russia*. (in Russian)

Информация об авторах

Бондаренко Юрий Викторович – аспирант, Кубанский государственный университет (350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149). E-mail: bondyv@yandex.ru

Борисов Алексей Алексеевич – кандидат юридических наук, старший научный сотрудник, Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем (123242, Россия, г. Москва, ул. Баррикадная, д. 8, стр. 5А). E-mail: alexeyborisovru@yandex.ru

Ботян Екатерина Алексеевна – заведующий отделом обращения с отходами, Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие «БелНИЦ «Экология» (220095, Беларусь, г. Минск, ул. Г. Якубова, д. 76). E-mail: wastes@ecoinfo.by

Кулевская Наталья Анатольевна – младший научный сотрудник, Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие «БелНИЦ «Экология» (220095, Беларусь, г. Минск, ул. Г. Якубова, д. 76). E-mail: natali.kulevskayaa@mail.ru

Франсузов Борис Валерьевич – соискатель кафедры экономики предприятий, Уральский государственный экономический университет (620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62/45). E-mail: frantsuzov_boris@inbox.ru

Чупрова Юлия Николаевна – младший научный сотрудник, Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем (123242, Россия, г. Москва, ул. Баррикадная, д. 8, стр. 5А). E-mail: chuprova_ulia@mail.ru

Author information

Yuri V. Bondarenko – Postgraduate Student, Kuban State University (149, Stavropolskaya St., 350040, Krasnodar, Russia). E-mail: bondyv@yandex.ru

Alexey A. Borisov – Ph. D. (Law), Senior Researcher, Ural State Research Institute of Regional Environmental Problems (8, 5A, Barricadnaya St., 123242, Moscow, Russia). E-mail: alexeyborisovru@yandex.ru

Ekaterina A. Botyan – Head of the Waste Management Department, Republican Unitary Enterprise “Belarusian Scientific Research Center “Ecology” (76, G. Yakubova St., 220095, Minsk, Belarus). E-mail: wastes@ecoinfo.by

Natalia A. Kulevskaya – Junior Researcher, Republican Unitary Enterprise “Belarusian Scientific Research Center “Ecology” (76, G. Yakubova St., 220095, Minsk, Belarus). E-mail: natali.kulevskayaa@mail.ru/

Boris V. Frantsuzov – Applicant for the Department of Enterprise Economics, Ural State Economic University (62/65, Marta St., 620144, Yekaterinburg, Russia). E-mail: frantsuzov_boris@inbox.ru

Yulia N. Chuprova – Junior Researcher, Ural State Research Institute of Regional Environmental Problems (8, 5A, Barricadnaya St., 123242, Moscow, Russia). E-mail: chuprova_ulia@mail.ru

ЮБИЛЕИ
JUBILEE**АКАДЭМІК РАДЗІМ ГАЎРЫЛАВІЧ ГАРЭЦКІ.**
Да 95-годдзя з дня нараджэння
ACADEMICIAN RADZIM GAYRYLAVICH GARETSKY.
To the 95th anniversary

7 снежня 2023 г. споўнілася 95 гадоў Радзіму Гаўрылавічу Гарэцкаму – акадэміку Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, замежнаму члену Расійскай акадэміі навук, доктару геалага-мінэралагічных навук, прафесару, заслужанаму дзяржаўнаму навуку, лаўрэату Дзяржаўнай прэміі СССР і Дзяржаўнай прэміі БССР, прэміі Расійскай АН імя акадэміка М. С. Шацкага і прэміі НАН Беларусі і Сібірскага аддзялення РАН імя акадэміка В. А. Капцюга, акадэміку – заснавальніку Міжнароднай акадэміі экалогіі і Міжнароднай акадэміі навук Еўразіі, сябру Амерыканскага геафізічнага саюза, аднаму з «Выдатных людзей 20-га стагоддзя», паводле спіса Міжнароднага біяграфічнага цэнтру Кембрыджа.

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 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 давялося вучыцца ў 13 школах у розных гарадах і пасёлках. У 1947 г. ён паступіў на геалагаразведачны 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 (ПН).

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, сцвярджалася значнае пашырэнне ў геалагічным мінулым некампенсаванага прагінання, захаванасць старажытнага эразійнага рэльефу, глыбакаводных адкладаў.

1950–1960 гг. вызначыліся ў геалогіі сцвярджаннем парадэгмы новай глабальнай тэктонікі (тэктонікі пліт) і яе важнай часткі – вучэння аб маладых платформах. Радзім Гаўрылавіч асабліваю ўвагу надаваў даследаванням маладых платформ. У 1969 г. ён атрымаў вучоную ступень доктара геалага-мінэралагічных навук за працу «Тектоника молодых платформ Евразии», а ў 1972 г. выйшла яго манаграфія з такой жа назвай. У гэтай кнізе вылучаны асаблівае геалагічнае будовы і развіцця маладых платформ як адметнай катэгорыі тэктанічных элементаў літасферы і ў якасці тэктонатыпу абрана Цэнтральна-Еўразійская платформа, а Туранская пліта – як тэктонатып маладых пліт. 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 Р. Г. Гарэцкага і яго калег.

У гэты ж час Радзім Гаўрылавіч удзельнічаў у 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 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 «Геологической карты Западного Казахстана» маштабу 1 : 500 000 (1970).

Стварэнне тэктанічных карт займае важнае месца ў працы Р. Г. Гарэцкага. У 1968–1975 гг. ён з’яўляўся намеснікам старшыні Рэдакцыйнай камісіі па апрабаванні і зацвярджэнні геолога-геафізічных карт нафтагазаносных раёнаў тэрыторыі СССР маштабу 1 : 1 000 000. За ўдзел у стварэнні «Тектонической карты Евразии» (маштаб 1 : 5 000 000) і напісанне манаграфіі «Тектоника Евразии» яму разам з другімі вучонымі ГІНа на чале з А. Л. Яншыным у 1969 г. была прысуджана Дзяржаўная прэмія СССР.

За час працы ў ГІНе (1952–1971) у Радзіма Гаўрылавіча 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 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 Р. Г. Гарэцкі стаў 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 геалагамі па тэрыторыі Беларусі, Прыбалтыкі і заходніх абласцей Расіі. У выніку ў 1976 г. былі апублікаваны «Тэктанічная карта Беларусі і сумежных тэрыторый» маштабу 1 : 500 000 і манаграфія «Тектоника Беларуси». Быў прапанаваны новы метады складання тэктанічных карт паводле раянавання тэрыторыі па ўзросце галоўнага этапу фарміравання платформавых структур. У манаграфіі ўпершыню апісаны будова і этапы развіцця структур фундаменту і чыхла захаву СССР, вырашаліся некаторыя актуальныя праблемы тэктонікі старажытных платформ і тэктанічныя заканамернасці размяшчэння карысных выкапняў. За стварэнне «Тэктанічнай карты Беларусі і сумежных тэрыторый» і манаграфіі «Тектоника Беларуси» Р. Г. Гарэцкі 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 сумесныя праекты з замежнымі геалагамі, супрацоўніцтва з якімі ён распачаў яшчэ ў ГІНе з вывучэння палеазаідаў Еўразіі. Асабліва плённым такое супрацоўніцтва было ў 1975–1986 гг. па праекце № 86 Міжнароднай праграмы геалагічнай карэляцыі (МППГК) «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 – адзін з кіраўнікоў гэтага праекта – узначаліў даследаванні на тэрыторыі СССР і непасрэдна кіраваў тэктанічным напрамкам праекта. Адзін з асноўных вынікаў гэтай работы – складанне і выданне «Тэктанічнай карты паўднёва-заходняй Украіны Усходне-Еўрапейскай платформы» маштабу 1 : 1 500 000 (галоўны рэдактар Р. Г. Гарэцкі). Праведзеныя даследаванні далі магчымасць паглыбіць уяўленні аб тэктоніцы Еўропы і класіфікацыі комплекс літолага-палеагеаграфічных карт Заходняй і Цэнтральнай Еўропы.

Развіваючы вучэнне аб платформах, Р. Г. Гарэцкі асабліваю ўвагу надаў 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 палеарыфта, а разам з іншымі калегамі – праблему лістрычнай тэктонікі платформ наогул. Вялікае значэнне вучоны надаў інтэрпрэтацыі геофізічных матэрыялаў, вывучэнню глыбіннай будовы і геадынамікі платформ, іх сейсматэктанічнаму раянаванню. Вынікам гэтых мэтанакіраваных даследаванняў стала выданне пры ўдзеле і навуковым рэдагаванні Р. Г. Гарэцкага 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 платформ 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 саляноснага басейна сумесна з В. З. Кіслікам, Э. А. Высоцкім, Н. С. Пятровай і іншымі спецыялістамі дазволіла яму раскрыць заканамернасці распаўсюджвання, будовы, складу і ўтварэння дэвонскіх саляносных фармацый. Вынікі даследаванняў 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 занальнага прагнозаў. Новыя метадычныя прыёмы пошукаў радовішчаў нафты, распрацаваныя ім з калегамі, былі абаронены пяццю аўтарскімі пасведчаннямі аб вынаходніцтве. Сумесна з геологамі-нафтавікамі Беларусі, Літвы і 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 лідараў 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 двум профілям: Варэна – Нясвіж – Выступовічы і Бабруйск – Лельчыцы. Для выяўлення глыбіннай будовы асабліва важным было сейсмічнае і магніта-тэлурычнае зандзіраванне. У выніку былі здабыты фундаментальныя веды аб структуры і эвалюцыі літасферы захаду Усходне-Еўрапейскай платформы.

Вывучэннем геалагічнай будовы зямной кары Беларусі і навакольнай тэрыторыі Радзім Гаўрылавіч працягвае займацца і сёння. 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 палеарыфтовых структур Усходне-Еўрапейскай платформы.

У 1993 г. Р. Г. Гарэцкі быў членам беларускай дэлегацыі на Генеральнай канферэнцыі ЮНЕСКА ў Парыжы, дзе выступіў з прапановай правесці даследаванне навейшай геадынамікі Цэнтральнай Еўропы ў сувязі з праблемай паходжання катлавіны Балтыйскага мора. Ідэя была падтрымана і набыла статус праекта МПГК № 346 «Неагеадынаміка 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 неагеадынамічных працэсаў, уплываючых на развіццё тэрыторыі Цэнтральнай Еўропы, сярод іх – залажэнне ў сярэднім плейстацэне Усходне-Балтыйскай рыфтавай сістэмы трайнага сучлянення, фарміраванне якой прадаўжаецца і сёння. Вынікі гэтых даследаванняў падведзены ў манаграфіях «Неотектоника и неогеодинамика Восточно-Европейской платформы» (2009, разам з Р. Я. Айзбергам і А. К. Карабанавым) і «Сейсмоструктурная модель 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 разам з Г. І. Каратаевым ім 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 паказала, што Фенаскандынаўскі, Сармацкі і Волга-Уральскі сегменты, якія ўтвараюць Усходне-Еўрапейскі кратон, аб'яднаны элементам унікальнай структуры – Слабоцкім тэктона-геадынамічным 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 ўплыў яе на магчымую алмазаноснасць Беларусі (Р. Г. Гарэцкі, Г. И. Каратаев «Шовные зоны Феноскандии, Сарматии и Волго-Уралии», 2014).

Пастаянная ўвага Р. Г. Гарэцкага да аэра- і космаінфармацыі як спосабаў вывучэння геалогіі, і асабліва тэктонікі, таксама дала плён: пад яго кіраўніцтвам у 1988 г. была складзена першая «Косма-тэктанічная карта Беларусі» маштабу 1 : 2 000 000, а ў 2012 г. – новая карта маштабу 1 : 500 000.

Навукова-арганізацыйная дзейнасць Радзіма Гаўрылавіча 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 Рэспублікі Беларусь 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, у Беларускім дзяржаўным універсітэце пасля 30-гадовага перапынку пачалася падрыхтоўка геалагаў. 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 геафізікі, 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 зроблены ім ў праграмным артыкуле «Проблемы геологического изучения недр Беларуси» (Літасфера, 2010, № 1 (39)).

Шмат увагі Р. Г. Гарэцкі заўсёды надаваў рэдактарскай дзейнасці, будучы членам рэдкалегіі часопіса РАН «Геотектоника», рэдакцыйнага савета міжнароднага часопіса «Геофизический журнал», рэдкалегіі «Геологического журнала» (Україна) і іншых замежных выданняў. Як член рэдкалегіі ён удзельнічаў у падрыхтоўцы «Энцыклапедыі прыроды Беларусі» (у 5 т.) і «Беларускай энцыклапедыі» (у 18 т.). Радзім Гаўрылавіч – стваральнік і галоўны рэдактар (1994–2010 гг.; цяпер – член 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 Р. Г. Гарэцкага ці пры яго сумесным з іншымі рэдагаванні выйшла з друку 140 найменняў навуковых выданняў.

Акадэмік Р. Г. Гарэцкі – выдатны вучоны ў многіх галінах геалогіі. Ён аўтар і суаўтар 45 манаграфій і асобных выданняў, удзельнічаў у складанні, рэдагаванні і выданні 50 карт геалагічнага зместу, яго аўтарства пазначана ў больш як 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 Р. Г. Гарэцкага прыкметнае месца займае папулярызацыя геалагічных ведаў, ён аўтар шматлікіх брашур, артыкулаў, нарысаў і лекцый, сярод іх – прысвечаныя гісторыі геалогіі і асобным выдатным дзеячам навук аб Зямлі. Пра свайго навуковага настаўніка ён напісаў кнігу «Академик Яншин – дорогой мой учитель и друг» (2005).

За поспехі ў развіцці геалагічнай навукі Радзім Гаўрылавіч узнагароджаны ордэнам Працоўнага Чырвонага Сцяга, Ганаровымі граматамі Вярхоўнага Савета БССР і Прэзідыума НАН Беларусі, мае 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 узнагароджаны Дыпламам Топ-10 вынікаў дзейнасці вучоных Нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі ў галіне фундаментальных і прыкладных даследаванняў за 2018 год за распрацоўку новых уяўленняў аб палеагеадынамічнай эвалюцыі глыбінных зон зямной кары і верхняй мантыі Прыпяцкага і Дняпроўскага палеарыфтавых нафтагазаносных басейнаў, якія дазваляюць павысіць эфектыўнасць геалагаразведаных работ.

Асаблівае месца ў жыцці Радзіма Гаўрылавіча займаюць праблемы адраджэння беларускай культуры і мовы, незалежнасці нашай краіны, прысутнасці беларусаў у свеце. Тым самым ён працягвае традыцыі выдатных вучоных і асветнікаў – бацькі Гаўрылы Іванавіча і дзядзькі Максіма Іванавіча Гарэцкіх. З 1990 г. Р. Г. Гарэцкі – сябра Рады, а ў 1993–2001 гг. – прэзідэнт Згуртавання беларусаў свету «Бацькаўшчына», быў адным з арганізатараў шасці з'ездаў беларусаў свету. Ён сябра Рады Таварыства беларускай мовы Беларускай інтэлігенцыі, Беларускага фонду культуры і іншых, натхняльнік і арганізатар штогадовых Чытанняў братоў Гарэцкіх. Радзім Гаўрылавіч выступае як прафесійны пісьменнік (ён сябра пісьменніцкай арганізацыі з 2004 г.). Яго пяру 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», 2012 (у суаўтарстве) 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 так і называецца «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. Позірк 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 гэтага часу плённа працуе галоўным навуковым супрацоўнікам у лабараторыі геатэктонікі і геафізікі Інстытута прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Захопленасць навукай, арганізацыйны талент і высокія чалавечыя якасці прыцягваюць да Радзіма Гаўрылавіча ўсіх, хто ведае яго і працуе з ім. Яму ўласцівы інтэлігентнасць, аптымізм і добразычлівасць, дэмакратызм, увага да калег, здольнасць бачыць галоўнае ў складаных праблемах. Р. Г. Гарэцкі – выдатны вучоны і грамадскі дзеяч. Ён актыўна працуе на карысць роднай краіны, працягвае і развівае лепшыя традыцыі навукі і грамадскай думкі.

Калегі, паплечнікі і сябры шчыра віншуюць шаноўнага Радзіма Гаўрылавіча з юбілеем і зычаць яму моцнага духу, здароўя, шчасця і радасці ад сваёй вялікай і плённай працы на карысць Бацькаўшчыны!

**С. А. Лысенка, А. В. Мацвееў, У. Ф. Логінаў, А. А. Махнач,
А. В. Кудзельскі, Я. Г. Грыбік, В. Г. Жогла, Р. Э. Гірын,
Г. А. Камышэнка, Я. А. Кухарык**

ПАМЯТИ УЧЕНОГО MEMORY OF A SCIENTIST

Ромма Ефимович Айзберг (1933–2022).

К 90-летию со дня рождения

Romma Yefimovich Aizberg (1933–2022).

To the 90th of the birth



16 июня 2023 г. исполнилось 90 лет со дня рождения члену-корреспонденту НАН Беларуси, доктору геолого-минералогических наук, профессору Ромме Ефимовичу Айзбергу.

Р. Е. Айзберг родился в г. Артемовске (Бахмут) Донецкой области (Украина). В 1951 г. окончил среднюю школу с золотой медалью и поступил на геологоразведочный факультет Новочеркасского политехнического института. После окончания учебы в 1956 г. и присвоения квалификации горного инженера-геолога продолжительное время работал в Туркменистане.

В 1965 г. Ромма Ефимович приехал в Минск и стал работать в БелНИГРИ. Начался этап его профессиональной деятельности, связанный с изучением тектоники, региональной и нефтяной геологии территории Беларуси.

В этот период ученый участвовал в разработке нового подхода к изучению тектоники Припятского прогиба, основанного на представлениях о блоковом строении этой структуры. Новая тектоническая схема стала базой для нефтегеологического районирования Припят-

ского прогиба, была положена в основу проектирования нефтепоисковых работ и до сих пор не утратила актуальности.

За создание Тектонической карты Беларуси и смежных территорий масштабом 1 : 500 000 и монографии «Тектоника Белоруссии» в 1978 г. Р. Е. Айзберг в составе группы ученых и геологов-практиков был удостоен звания лауреата Государственной премии БССР. В данной работе обобщен огромный объем геолого-геофизического материала, накопленный геологами Беларуси, республик Прибалтики и западных областей России.

В 1977 г. Роман Ефимович завершил работу над докторской диссертацией на тему «Структуры и формации чехла запада Русской плиты и их эволюция», которую защитил в 1978 г. в Московском государственном университете по специальности «геотектоника». В диссертации было показано, что доплитные и плитные этапы развития Восточно-Европейской и других древних платформ характеризовались существенными различиями, которые выражены вполне определенными, закономерно изменяющимися во времени ассоциациями типов структур и формаций, стилем плективных и разрывных деформаций доплитных и плитных комплексов платформенного чехла.

В 1980–1984 гг. Р. Е. Айзберг находился в служебной командировке в ГДР, где в должности главного специалиста – консультанта Центрального геологического института (г. Берлин) изучал проблемы тектоники нефтегазоносных комплексов Центральной Европы.

В 1990 г. Ромма Ефимович перешел на работу в Академию наук БССР, став главным научным сотрудником Института геохимии и геофизики. Со второй половины 1990-х годов заметное место в его исследованиях заняли проблемы сейсмотектоники и неогеодинамики. Вместе с коллегами Р. Е. Айзберг опубликовал ряд статей, посвященных сейсмотектоническому и неотектоническому районированию запада Восточно-Европейской платформы и Центральной Европы, обоснованию выделения зон возможных очагов землетрясений.

Важная часть научных исследований Роммы Ефимовича связана с изучением проблем нефтегазоносности. Разработанные карты нефтегеологического районирования Припятского палеорифтового бассейна (1968, 1972, 1988) и карта нефтегеологического районирования Беларуси (1999) стали основой для планирования нефтепоисковых работ в нашей стране.

Р. Е. Айзберг – участник исследований по нескольким крупным международным научным проектам: «Евробридж», Георифт-2013, «Неогеодинамика депрессии Балтийского моря и сопредельных областей», «Нефтегазоносность верхнепротерозойских и палеозойских комплексов Беларуси и Сибири» и др. Научный итог этих работ – новая модель строения литосферы территории Беларуси, новая неотектоническая карта Центральной Европы, оценка генетических связей неотектонических структур с глубинным строением региона, выявление условий нефтегазообразования и нефтегазонакопления в разнотипных платформенных структурах.

С 2008 г. Ромма Ефимович работал в Институте природопользования НАН Беларуси. В 2016–2018 гг. под руководством Р. Е. Айзберга выполнялся проект по исследованию и оценке потенциала нетрадиционных сланцевых источников углеводородного сырья в недрах Беларуси, в результате которого была разработана методология изучения таких источников применительно к нефтегазонасному Припятскому, а также нефтеперспективным Подляско-Брестскому и Оршанскому осадочно-породным бассейнам.

На основе результатов анализа новейших материалов в 2011 г. построены карты структурного районирования подсолевого и межсолевого комплексов Припятского прогиба для решения задач эффективного освоения ресурсов углеводородов (В. Н. Бескопыльный, Р. Е. Айзберг, Я. Г. Грибик). Эти карты и пояснительные записки к ним являются ориентиром при постановке нефтеразведочных работ в Беларуси. Созданы также карты районирования подсолевого и межсолевого комплексов Припятского бассейна по условиям нефтегазообразования, которые находят применение для прогноза перспектив использования нетрадиционных скоплений углеводородов и для оконтуривания наиболее перспективных участков поисков традиционных нефтяных залежей. Указанные разработки обобщены в монографии «Нетрадиционные источники углеводородного сырья в недрах Беларуси: геологические аспекты», вышедшей в 2022 г. (авторы: Р. Е. Айзберг, Я. Г. Грибик, В. Н. Бескопыльный, Е. Ф. Никуленко; под редакцией Р. Е. Айзберга и Я. Г. Грибика).

В 2022 г. НАН Беларуси присудила премию в области химических наук и наук о Земле за цикл работ «Результаты геолого-технологических исследований углеводородного сырья недр Беларуси» Я. Г. Грибику, В. Н. Бескопыльному, П. П. Повжику. К сожалению, Р. Е. Айзберг в связи с уходом из жизни по условиям конкурса не был включен в состав авторов этого цикла работ, хотя его большая заслуга в его создании несомненна.

Научные заслуги Роммы Ефимовича отмечены Почетной грамотой Совета Министров Республики Беларусь. В 2004 г. вместе с группой белорусских и сибирских ученых он был удостоен премии СО РАН и НАН Беларуси имени академика В. А. Коптюга, а за цикл работ «Разломы и линейные элементы земной коры Беларуси: теоретические и прикладные аспекты» – премии НАН Беларуси (2008). В 2013 г. Р. Е. Айзберг был награжден Почетной грамотой Президиума НАН Беларуси за значительный вклад в изучение тектоники, геодинамики и нефтегазоносности Беларуси, подготовку научных кадров. В 2018 г. Президиумом НАН Беларуси исследователь награжден Дипломом Топ-10 результатов деятельности ученых Национальной академии наук Беларуси в области фундаментальных и прикладных исследований за создание геолого-геофизической модели глубинного строения земной коры и верхней мантии Припятского и Днепровского палеорифтовых нефтегазонасных бассейнов (совместно с Р. Г. Гарецким, Г. И. Каратаевым, Я. Г. Грибиком).

Многих людей, знавших Ромму Ефимовича – одного из лидеров геологической науки Беларуси, пользовавшегося широкой известностью и огромным авторитетом как в нашей стране, так и далеко за ее пределами, – привлекали в нем увлеченность геологией, большая культура, энциклопедические знания, доброжелательность, готовность прийти на помощь.

Мы навсегда сохраним светлую память о Ромме Ефимовиче Айзберге.

**С. А. Лысенко, Р. Г. Гарецкий, А. В. Матвеев,
В. Ф. Логинов, А. А. Махнач, А. В. Кудельский,
Я. Г. Грибик, Г. А. Камышенко, Р. Э. Гури**

Иван Иванович Романенко (1943–2021).
К 80-летию со дня рождения
Ivan Ivanovich Romanenko (1943–2021).
To the 80th of the birth

4 декабря 2023 г. исполнилось 80 лет со дня рождения бывшего сотрудника Института природопользования НАН Беларуси Ивана Ивановича Романенко, внесшего значительный вклад в развитие экспериментального приборостроения в области исследования мерзлых грунтов. Иван Иванович Романенко родился в поселке Закурганье Погарского района Брянской области в крестьянской семье. В 1958 г. после успешного окончания 7 классов поступил в Минский политехникум, который закончил с отличием в 1962 г., получив квалификацию техника-механика по специальности «Разработка торфяных месторождений».

По распределению И. И. Романенко был направлен на Торфяную опытную станцию «Дукора» Института торфа АН БССР, где и началась его трудовая деятельность: сначала – в должности техника, а затем – механика-прибориста. В 1963 г. он поступил на первый курс торфяного факультета Белорусского политехнического института, который закончил в 1968 г., получив квалификацию инженера-механика по специальности «Торфяные машины».

Проработав по распределению в проектно-конструкторском институте «Белгипроторф» в должности инженера технологического отдела с 1968 по 1970 г., Иван Иванович перешел на работу в БелНИИМиВХ на должность младшего научного сотрудника лаборатории автоматизации и измерительных приборов, в 1975 г. – в 110 отделение ЦКБ с ОП АН БССР и в том же году поступил в аспирантуру Института торфа.

После окончания аспирантуры И. И. Романенко работал младшим научным сотрудником лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем. В 1988 г. защитил диссертацию «Прочность и деформируемость торфа при отрицательных температурах» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.05 «Технология и комплексная механизация торфяного производства».

Сферой научных интересов Ивана Ивановича являлось изучение физико-механических свойств грунтов при отрицательных температурах. Им разработаны оригинальные методики и специальное экспериментальное оборудование для исследования свойств мерзлых грунтов, получены новые важные научные и практические результаты, позволившие установить основные закономерности в изменении прочности и деформируемости грунтов при промерзании.

Необходимо отметить высокую активность И. И. Романенко в заключении и выполнении прямых договоров по исследованиям теплофизических и деформационно-прочностных характеристик грунтов в регионах многолетней мерзлоты по заказам специализированных учреждений Российской Федерации, таких как ПНИИИС (Москва), ЗапСибПНИИИС (Тюмень), предприятие п/я В-8209 (Москва). Эта серия работ была направлена на освоение газопромысловых объектов на полуострове Ямал, Вынгапуповского газоконденсатного месторождения, а также инженерных сооружений оборонного комплекса СССР в регионах многолетней мерзлоты. Часть исследований выполнялась в условиях Северной научно-исследовательской мерзлотной станции (г. Лабытнанги), где И. И. Романенко неоднократно бывал в длительных командировках.

При выполнении исследований и трактовке полученных результатов Иван Иванович был чрезвычайно точен, предельно аккуратен и инициативен.

С 1991 по 2002 г. И. И. Романенко, не оставляя научной работы, работал главным инженером Института. На этой должности проявились его выдающиеся организаторские способности, умение работать с людьми, такт и обаяние. Будучи прекрасным инженером-механиком, хорошо разбираясь в электронике, Иван Иванович не только консультировал обращавшихся к нему коллег по вопросам организации исследований, разработке методического и приборного обеспечения, но и помогал в их практической реализации.

В обязанности главного инженера входило поддержание в рабочем состоянии инженерных коммуникаций корпуса Института. При его непосредственном участии и под его руководством были выпол-



нены работы по реконструкции системы водоснабжения и водоотведения корпуса. По мнению заместителя директора института по научным вопросам А. Э. Томсона, И. И. Романенко был образцовым главным инженером, который детально вникал и решал проблемы, связанные с техническим обеспечением научных исследований в Институте.

В 2002 г. Иван Иванович оставил должность главного инженера и полностью сосредоточился на научной работе. До выхода на пенсию в 2014 г. он работал по различным проектам, связанным с изучением прочностных характеристик мерзлых грунтов.

Будучи сыном фронтовика, полкового разведчика, И. И. Романенко с особым уважением относился к ветеранам Великой Отечественной войны. Мы помним Ивана Ивановича как необычайно чуткого и отзывчивого человека, всегда готового дать грамотный совет и оказать квалифицированную помощь. Все сотрудники Института, коллеги и друзья вспоминают его с большой теплотой и уважением. В нашей памяти Иван Иванович Романенко остался как прекрасный Человек, талантливый Инженер и замечательный Ученый.

***А. Э. Томсон, Ю. Г. Янута, А. И. Сорокин,
Г. П. Бровка, И. В. Дедюля***

ХРОНИКА CHRONICS

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУК О ЗЕМЛЕ: ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСГРАНИЧНЫХ РЕГИОНОВ» VI INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE “ACTUAL PROBLEMS OF EARTH SCIENCES: CROSS-BORDER STUDIES”

26–28 октября 2023 г. в Брестском государственном университете имени А. С. Пушкина состоялась VI международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов». Конференция проводится раз в два года, начиная с 2011 г., а с 2015 г. она включена в план научных, научно-технических и научно-практических мероприятий Национальной академии наук Беларуси. Организаторами мероприятия выступили Институт природопользования НАН Беларуси, Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина и Брестский государственный технический университет.



В начале работы конференции с приветственным словом выступили ректор Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина Ю. П. Голубев, заместитель Председателя Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь Д. В. Капский, директор Института природопользования НАН Беларуси С. А. Лысенко, главный архитектор Брестской области Н. Н. Власюк, академик НАН Беларуси В. Ф. Логинов, ректор Брестского государственного технического университета С. А. Касперович и др. В ходе пленарного заседания были представлены научные доклады по актуальным вопросам геологии, климатологии, экологии, а также геополитики и урбанографии.

Дальнейшее обсуждение научных вопросов в рамках конференции продолжилось по трем секциям: «Общая и региональная геология», «География и природопользование» и «Урбанография и сити-менеджмент».

В ходе секционного заседания по направлению «Общая и региональная геология» были заслушаны и обсуждены результаты научных исследований в области тектоники, геохимии, геологии кристаллического фундамента Беларуси, экологической геологии, четвертичной геологии, палеонтологии, палеогеографии, геоморфологии, применения геоинформационных систем в геологических исследованиях. С научными сообщениями выступили сотрудники филиала «Институт геологии» НПЦ по геологии (Минск, Беларусь), Института природопользования НАН Беларуси (Минск, Беларусь), Белорусского государственного университета (Минск, Беларусь), Витебского государственного университета имени П. М. Машерова (Витебск, Беларусь), Геологического института РАН (Москва, Россия), Института геологии и геохронологии докембрия РАН (Санкт-Петербург, Россия), Атлантического отделения Института океанологии РАН (Калининград, Россия), Балтийского федерального университета имени И. Канта (Калининград, Россия) и других организаций.

На заседании секции «География и природопользование» исследователями были представлены доклады по широкому спектру научных направлений, таких как климатология, метеорология, гидрология, геоэкология, биогеография, социально-экологической география, география туризма. Были заслушаны сообщения сотрудников Института природопользования НАН Беларуси (Минск, Беларусь), Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина (Брест, Беларусь), Брестского государственного технического университета (Брест, Беларусь), Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины (Гомель, Беларусь), Белорусского государственного университета (Минск, Беларусь), Московского городского педагогического университета (Москва, Россия), Астраханского государственного университета имени В. Н. Татищева (Астрахань, Россия), Санкт-Петербургского государственного университета (Санкт-Петербург, Россия) и др.

Во время работы секции «Урбаноология и сити-менеджмент» обсуждались вопросы, касающиеся комплексного развития городских территорий, тематического картографирования, урбометеорологии, урбоэкологии. Свои научные результаты доложили сотрудники Института природопользования НАН Беларуси (Минск, Беларусь), Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина (Брест, Беларусь), Белорусского национального технического университета (Минск, Беларусь), Витебского государственного медицинского университета (Витебск, Беларусь), Белорусского государственного университета (Минск, Беларусь), Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина (Рязань, Россия), Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (Москва, Россия), Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Россия) и др.

Таким образом, в рамках конференции свои доклады представили многие авторитетные исследователи, как из академических институтов, так и из учреждений образования и производственных организаций. Всего в ее работе приняли участие 210 человек, которые благодаря современным информационно-коммуникационным технологиям смогли продуктивно пообщаться друг с другом как лично, так и на расстоянии.

Для гостей и участников конференции была организована интересная экскурсионная программа, включающая обзорную экскурсию по Национальному парку «Беловежская пуща».

М. А. Богдасаров, Е. А. Кухарик

Научное издание
Scientific publication

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
NATURE MANAGEMENT

№ 2, 2023

Редактор Н. Т. Гавриленко
Editor N. T. Gavrilenko

Компьютерная верстка Т. Н. Козловская
Computer page making T. N. Kozlovskaya

Переводчик М. Ю. Кравченко
Translator M. U. Kravchenko

Подписано в печать 20.12.2023.	<i>Signed into print 20.12.2023.</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. 21,2.	<i>Conditional printed sheets 21,2.</i>
Уч.-изд. л. 20,7.	<i>Conditional edited sheets 20,7.</i>
Тираж 100 экз.	<i>Circulation 100 copies.</i>
Заказ № 571.	<i>Order No. 571.</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 licence No. 02330/89 of 3 March 2014.</i>
Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск	<i>Kalvarijskaya Str. 17, 220004, Minsk</i>